

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta Textilní**

**Katedra hodnocení textilií**

**PŘÍPRAVA A TESTOVÁNÍ POVRCHŮ S DEFINOVANOU  
DRSNOSTÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**PREPARATION AND TESTING OF SURFACES WITH DEFINED  
ROUGHNESS**

**Diploma Thesis**

Počet stránek: 86  
Počet obrázků: 54  
Počet tabulek: 9  
Počet příloh: 2

Vypracovala: Bc. Anna Stelmakh  
Vedoucí práce: Prof.Ing. Jakub WIENER, Ph.D.

**Liberec 2013**

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

Datum

Podpis

## Poděkování

Srdečně chci poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Prof.Ing. Jakubovi Wienerovi, Ph.D za inspirace, skvělé nápady a čas, který věnoval vzniku této práce.

Dále nemohu nepoděkovat lidem, co mi velice láskavě pomohli s poskytnutím laboratorního zařízení, podíleli se na snímání obrázků vyrobených vzorků a prvotřídních konzultacích. Mnohokrát děkuji panu profesorovi Ing. Jiřímu Militkému CSc., panu docentovi Ing. Jiřímu Ungerovi, CSc., inženýrce Janě Grabmüllerové, pani Martině Čimburové, panu inženýrovi Jiřímu Chaloupkovi, Ph.D., pani inženýrce Denise Zálešákové, panu docentovi Ing. Marošovi Tunákovi, Ph.D.

Také děkuji panu inženýrovi Petru Šperkovi, Ph.D. z VÚT v Brně za ochotnou spolupráci a snímání vzorků.

Dále chci poděkovat blízkému kamaradovi Michalu Kučerovi za podporu a uskutečnění experimentu v potoce za studeného počasí.

## Anotace

Cílem této diplomové práce bylo připravit povrchy s různorodou drsností a dále měření odporové síly u vyrobených vzorků. Základním materiálem byla zvolena polyesterová fólie. Rešeršní část se zabývá nastíněním biomimetiky žraločí kůže, vysvětlením hydrodynamických pojmů, popisem různých možných úprav povrchů pro dosažení rozmanité drsnosti a metod hodnocení drsnosti.

Experimentální část je věnována detailnímu popisu výroby vzorků, získání parametrů jejich drsnosti, návrhu experimentu pro měření odporové síly vzorků při proudění vody a vyhodnocení experimentů.

**Klíčová slova:** biomimetika, odporová síla, drsnost, úprava polyesterového povrchu, CO<sub>2</sub> laser, kyselina sírová

## Annotation

This master's degree thesis focuses on development and sampling of surfaces with various roughness, determination and description of roughness and measuring of samples' drag force in water. Thin polyester film was chosen as basic material for samples. The first part of the thesis presents short review of shark's skin biomimetics, elucidation of basic hydrodynamics principles and definitions, prospective surface modifications and their evaluation.

The experimental part focuses on sample preparation, evaluation of surface roughness, drag force measurement and statistical analysis of achieved results.

**Key words:** biomimetics, drag force, surface roughness, polyester film modification, CO<sub>2</sub> laser, sulfuric acid

## Obsah

Seznam obrázků .....	6
Seznam tabulek .....	8
Seznam příloh .....	8
Seznam použitých symbolů .....	9
<b>ÚVOD</b> .....	11
<b>1. REŠERŠNÍ ČÁST</b> .....	13
<b>1.1 Biomimetika žraločí kůže</b> .....	13
1.1.1 Žraločí kůže .....	13
1.1.2 SPEEDO Fastskin .....	14
1.1.3 LZR Racer .....	15
1.1.4 Rýhovaný materiál .....	15
1.1.5 Sharklet .....	15
<b>1.2 Drsnost povrchu</b> .....	16
1.2.1 Pojem drsnosti .....	16
1.2.2 Hodnocení drsnosti .....	17
1.2.3 Metody hodnocení drsnosti povrchů .....	18
1.2.3.1 Mechanická metoda .....	18
1.2.3.2 Optická metoda .....	18
<b>1.3 Hydromechanika</b> .....	19
1.3.1 Vymezení důležitých pojmů .....	19
1.3.2 Rozdělení proudění .....	20
1.3.3 Reynoldsovo číslo .....	21
1.3.5 Úplav .....	23
1.3.6 Odporová síla $F_{drag}$ (drag force) .....	23
1.3.7 Vztlková síla (buoyancy) .....	25
1.3.8 Vliv drsnosti povrchu .....	25
1.3.9 Metody měření odporové síly .....	27
1.3.9.1 Anemometrie .....	27
1.3.9.2 Pokus s volnou fólií („flapping foil“) .....	28
1.3.9.3 Měření pasivního odporu .....	30
1.3.9.4 Zkouška s živým plavcem (active swimmer test) .....	31
<b>1.4 Možnosti úpravy povrchů fólií</b> .....	31
1.4.1 Úprava pomocí laseru .....	32
1.4.1.1 Laserová technologie .....	32
1.4.1.2 Všeobecná charakteristika a oblasti použití .....	33
1.4.1.3 Typy laserů .....	35
1.4.1.4 Parametry laseru .....	36

1.4.1.5 CO <sub>2</sub> laser .....	36
1.4.2 Úprava pomocí tepelného zpracování .....	37
1.4.3 Úprava pomocí O <sub>2</sub> plazmy a UV záření .....	38
1.4.4 Úprava metodou potiskování .....	39
1.4.5 Úprava nánosem částic na povrch .....	40
1.4.6 Chemická úprava .....	40
1.4.7 Použití upraveného materiálu .....	41
<b>2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1 Použité materiály .....</b>	<b>42</b>
<b>2.2 Použité zařízení .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3 Příprava vzorků pomocí laseru .....</b>	<b>50</b>
2.3.1 Bezpečnost práce s laserovým zařízením .....	51
2.3.2 Nastavené parametry při ozařování .....	51
2.3.3 Orientační pokus .....	51
2.3.4 Příprava vzorků .....	52
<b>2.4 Příprava vzorků pomocí H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> .....</b>	<b>56</b>
2.4.1 Bezpečnost práce s koncentrovanými kyselinami .....	56
2.4.2 Orientační pokus .....	56
<b>2.5 Úprava povrchu fólií pomocí nanášení prášků .....</b>	<b>59</b>
2.5.1 Stanovení teploty tání prášků .....	59
2.5.2 Příprava vzorků .....	60
<b>2.6 Měření smáčivosti povrchů vzorků .....</b>	<b>61</b>
2.6.1 ANOVA .....	62
2.6.2 Vzorky upravené kyselinou sírovou .....	63
2.6.3 Vzorky upravené pomocí laseru .....	64
2.6.4 Vzorky s nataveným práškem a brusné papíry .....	66
2.6.5 Kompletní porovnání kontaktních úhlů .....	67
<b>2.7 Stanovení parametrů drsnosti .....</b>	<b>68</b>
2.7.1 Původní fólie .....	69
2.7.2 Vzorky upravené pomocí kyseliny .....	70
2.7.3 Vzorky upravené natavováním prášků a brusné papíry .....	72
2.7.4 Vzorky upravené pomocí laseru .....	72
2.7.5 Kompletní porovnání drsností povrchů .....	73
<b>2.8 Měření odporové síly .....</b>	<b>73</b>
<b>3. DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>81</b>
<b>4. ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>

## Příholy

## Seznam obrázků

Obr. 1 Žraločí kůže (*Sphyrna tiburo*)

Obr. 2 SEM snímek SPEEDO Fastskin II; makrosnímek struktury povrchu

Obr. 3 SEM snímek rýhovaného materiálu

Obr. 4 Porovnání Sharklet a žraločí kůže; ukázka nárůstu bakterií na klasickém povrchu lodi a Sharklet

Obr. 5 Schematické znázornění geometrie povrchu v řezu

Obr. 6 Schematický popis střední aritmetické hodnoty  $R_a$

Obr. 7 Různé profily povrchů se stejnou hodnotou drsnosti  $R_a$

Obr. 8 Grafické znázornění laminárního a turbulentního proudění v potrubí

Obr. 9 Schematické znázornění možného proudění při obtékání válce

Obr. 10 Posun  $Re$  vzhledem k členitosti povrchu

Obr. 11 Schematické znázornění působících sil na plavce při plavání

Obr. 12 Závislost odporového součinitele na tvaru tělesa

Obr. 13 Grafické znázornění možnosti chování toku na povrchu s odlišnou drsností

Obr. 14 Moodyho Graf

Obr. 15 Příčné a podélné umístění drážek Fastskin II a rýhovaného materiálu vůči pohybu (vůči toku)

Obr. 16 Umístění šupin žraločí kůže v rámu

Obr. 17 Schématické znázornění systému pro měření pasivního odporu

Obr. 18 Vrásnění na vzorku tenké fólie s pružným podkladem

Obr. 19 Možnosti vzorování laserem

Obr. 20 Princip laseru

Obr. 21 Světelné paprsky žárovky a koherentního záření – laseru

Obr. 22 Schematické znázornění pracovního cyklu laseru

Obr. 23 Schéma postupu tepelného zpracování PDMS s nánosem kovů a ochlazením na pokojovou teplotu

Obr. 24 Oxidace plazmou za zvýšených teplot se simultánním jednosměrným napínáním vzorku; oxidace plazmou za stálých teplot s následným tvořením trhlin na povrchu vzorku

Obr. 25 Vrásnění na PDMS vzorcích, dosažené ošetřováním povrchů plazmou a s aplikací masek s odlišným profilem

- Obr. 26 Vrásnění na PDMS pomocí UV záření s aplikací masky
- Obr. 27 Schéma mikro potiskování
- Obr. 28 PES fólie zpracovaná 10 min v 70% roztoku kyseliny sírové (A); PES fólie zpracovaná 3 sec v 80% roztoku kyseliny sírové
- Obr. 29 Laserový systém Marcatex 150 Flexi
- Obr. 30 Advex See System
- Obr. 31 Snímek udělaný pomocí Advex See System
- Obr. 32 Rastrovací elektronový mikroskop PHENOM od FEI
- Obr. 33 Makroskop NAVITAR se systémem nasvícení KAISER
- Obr. 34 Laserový systém Talysurf CLI 500
- Obr. 35 Optický 3D mikroskop ContourGT-K
- Obr. 36 Siloměr značky Vernier
- Obr. 37 Přenosný datalogger LabQuest 2
- Obr. 38 Vzorky s laserovou úpravou povrchu. Vlevo – horní pohled, vpravo – příčný řez
- Obr. 39 Změna vzhledu PES fólie po zpracování v 95%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  po dobu 10 s
- Obr. 40 Původní fólie
- Obr. 41 Fólie zpracována v 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  po dobu 10 min. a po 30 min.
- Obr. 42 Fólie zpracovaná po dobu 10 s v 90% a 95%  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Obr. 43 Příčný řez a horní pohled vzorků s nataveným práškem
- Obr. 44 95 % Interval spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, kyselina
- Obr. 45 95 % Interval spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, laser
- Obr. 46 95 % Interval spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, prášky a brusné papíry
- Obr. 47 95 % Interval spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů
- Obr. 48 Snímek fólie s malým množstvím nataveného prášku z makroskopu
- Obr. 49 3D snímek a 2D mapa profilu původní fólie
- Obr. 50 Ukázka 3D profilu a plošné mapy profilu povrchu fólie zpracované po dobu 20 s v kyselině
- Obr. 51 Schematické zobrazení měřicího systému se silami působícími na vzorek
- Obr. 52 Q-Q graf. Testování na normalitu naměřených hodnot pro vzorek původní fólie
- Obr. 53 95 % Interval spolehlivosti pro střední hodnoty odporových sil
- Obr. 54 Srovnání hodnot odporové síly a síly, naměřené pomocí siloměru



## Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí  $\text{H}_2\text{SO}_4$

Tab. 2 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí laseru

Tab. 3 Výsledky T-testu

Tab. 4 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky s prášky a brusné papíry

Tab. 5 Hloubka drážek na PES fólii v závislosti na době pulsu

Tab. 6 Parametry drsností povrchů

Tab. 7 Vztlková a gravitační síly

Tab. 8 Naměřená síla  $F_s$

Tab. 9 Odporová síla  $F_{drag}$

## Seznam příloh

Dodatek A Naměřená data kontaktních úhlů a síl.

Dodatek B Vzorky materiálů

## Seznam použitých symbolů

ANOVA	Analysis of variance
$\alpha$	úhel
$\beta$	úhel
Br.p.	brusný papír
$C_x$	součinitel tvaru a povrchu tělesa
CD	kompaktní disk
cm	centimetr
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
$D$	průměr trubice, kterou tekutina proudí
DVD	digitální video disk
F	testovací kritérium
$F_s$	naměřená síla
$F_A$	vztlaková síla
$F_{drag}$	odporová síla
$F_G$	tíhová síla
$F_{tv}$	odpor tvarový
g	tíhové zrychlení
$H_0$	nulová hypotéza
$H_1$	alternativní hypotéza
Hz	Hertz
h	hodina
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová
kW	kilowatt
min.	minuta
ml	mililitr
μm	mikrometr
μs	mikrosekunda
MPix	megapixel
$\eta$	viskozita tekutiny

N	Newton
nm	nanometr
PDMS	polydimetylsiloxán
PES	polyester
Q-Q	kvantil-kvantil graf
$\rho$	hustota
$R_a$	střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu
$R_{ku}$	špičatost povrchu
$R_q$	střední kvadratická hodnota drsnosti povrchu
$R_{sk}$	šikmost povrchu
$Re$	Reynoldsovo číslo
$Re_{kr}$	kritická hodnota Reynoldsova čísla
s	sekunda
$S$	plocha
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
$\bar{v}$	střední rychlost toku
V	Volt
$V$	objem
W	Watt
X	osa
Y	osa
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
°C	stupeň Celsia

# ÚVOD

Už mnoho let se lidstvo inspiruje kreativitou přírody. Pozorováním přírodních procesů, konstrukcí a jevů za účelem potenciálního uplatnění jejich principu pro vyřešení lidských potřeb a problémů se zabývá věda zvaná *biomimetika*.

Kupříkladu, nápady pro stvoření letadel i helikoptér vznikly pozorováním létajících ptáků a vážek. I když létání absolutně není přirozeným pohybem ani činností pro člověka, známí vědci jako Leonardo da Vinci stejně dokázali navrhnout funkční konstrukce, které létání umožňovaly.

Samočistící textilie byly návrženy podle principu „lotos effect“ (efekt lotosu), který lze v přírodě pozorovat právě na listech lotosu.

Příkladů biomimetiky v moderní technice je spousta. Pro tuto práci důležitým příkladem biomimetiky je snaha napodobit efekt žraločí kůže (shark skin). Jak již bylo zmíněno, nápad konstrukce letadla vznikl od ptáků. Otázkou je, proč se snažit napodobit žraločí kůži, když lidstvo od pradávných časů bylo schopné plavat?

Odpověď leží ve snaze stále se zdokonalovat a dosahovat lepších výsledků. Již v 80. letech minulého století se vědci začali zabývat vývojem speciálních plaveckých kostýmů pro sportovce na mezinárodní úrovni. Právě v tomto období se věda zaměřila na biomimetiku žraločí kůže, protože žralok je jedním z nejrychlejších mořských živočichů a dokáže se pohybovat ve vodě s malou ztrátou energie.

Světové značky, jako SPEEDO a jiné, nabízí řadu sportovních plavek a tvrdí, že tyto plavky díky svým vynikajícím hydrodynamickým vlastnostem doopravdy dokážou zvýšit rychlost plavců. Existuje velké množství vědeckých článků, týkajících se zkoumání pravdivosti těchto tvrzení. Stručný přehled některých metod testování bude uveden v rešeršní části této práce.

Je vhodné říci krátkou předmluvu k vzniku této diplomové práce. Práce vznikla z návrhu vytvoření různorodých mikro a nanopovrchů pomocí různých technologií,

např. prostřednictvím laseru, oxidací plazmou a jiných. Dále se v průběhu řešení objevila velmi zajímavá možnost zpracování povrchu polyesterových fólií kyselinou sírovou. V tento okamžik bylo rozhodnuto, pro získání různorodých povrchů, zaměřit se na úpravu polyesterové fólie.

Návrh použít metodu natavování prášků na polyesterovou fólii vedl k pochopení toho, že vlastně žraločí kůže je také velice drsná. Takto tedy došlo k návrhu výroby vzorků s různou drsností povrchů. Dále bude nutné popsat dosaženou drsnost a otestovat vzorky na hydrodynamické vlastnosti (zda konkrétní materiál s určitým povrchem usnadňuje průtok vody) za účelem následného možného využití vyrobených materiálů pro plavecký kostým s cílem zvýšit rychlost plavání a tudíž výkon plavce.

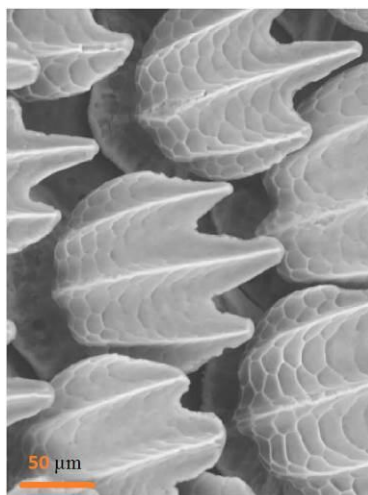
# 1. REŠERŠNÍ ČÁST

## 1.1 Biomimetika žraločí kůže

Níže bude uveden stručný přehled charakteristik žraločí kůže (shark skin) a vybraných materiálů vyvinutých na jejím principu.

### 1.1.1 Žraločí kůže

Východiskem pro návrh moderních materiálů pro plavecké kostýmy je žraločí kůže. obr. 1.



Obr. 1 Žraločí kůže (*Sphyrna tiburo*) [1].

Jak je vidět z obrázku 1, žraločí kůže není hladká, naopak, má povrch s výraznou drsností. Na povrchu jsou “zoubky”, zvané *plakoidní šupiny*, které jsou umístěny tak, že při plavání voda proudí podél výstupků na šupinách a ty jsou tím pádem schopny regulovat proudění vodního toku při pohybu. Rozměr a orientace šupin závisí na části těla žraloka a biologickému druhu [1].

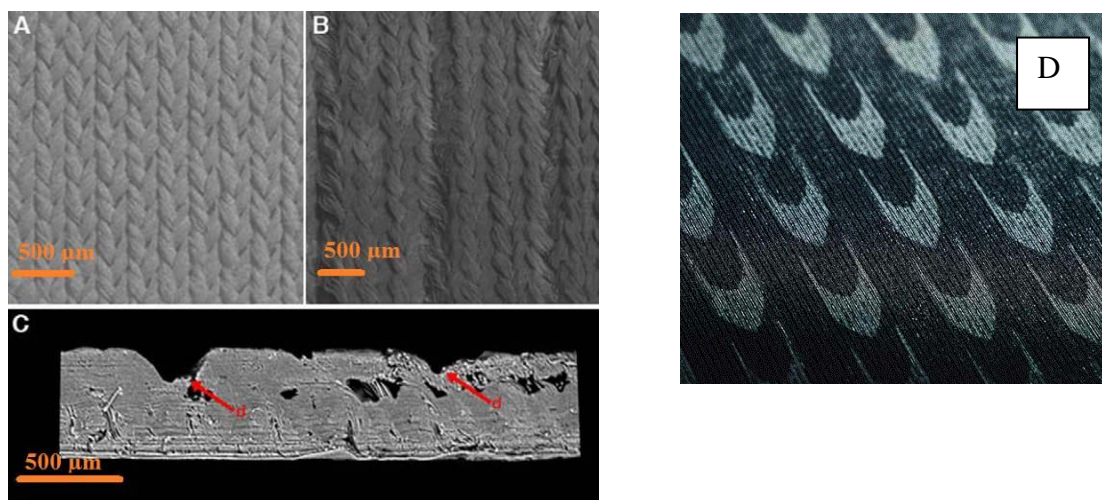
Charakteristické rozměry šupin jsou:

- délka (podél výstupku): 180 – 210 µm
- šířka: 130 – 180 µm
- rozpětí mezi výstupky na šupinách: 46 – 55 µm
- výška výstupku („zoubků“): 10 – 35 µm [1]

### 1.1.2 SPEEDO Fastskin

V roce 2000 společnost SPEEDO zahájila výrobu sportovních plavek s použitím inovačního materiálu SPEEDO Fastskin, který byl vyvinut na principu žraločí kůže a napodoboval pravou “Shark Skin” rýhami ve tvaru V-čka (V-shape). Od roku 2000 se tento materiál stále vyvíjí a na trhu lze nalézt již několik jeho generací pod obchodními názvy Fastskin FS II a Fastskin FS-Pro [2], [3].

Na obrázku 2 je znázorněný materiál Fastskin II.



Obr. 2 SEM snímek SPEEDO Fastskin II. Rubní strana materiálu (A), upravená lící strana (B), příčný řez (C) [1], makrosnímek struktury povrchu (D) [4]. Červené šipky (d) ukazují místa úpravy povrchu.

Fastskin je vyroben z 81% polyamidu a 19% elastanu. Na plavkách je biomimetický materiál umístěn hlavně na hrudníku, břiše, zádech a hýždích. Drážky jsou vůči sobě trochu pootočený, ale stejně jako šupiny u žraloků, jsou směřovány ve směru proudění vody kolem těla.

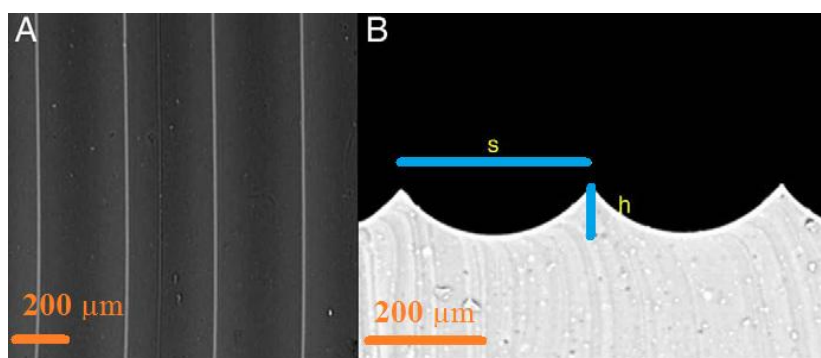
Jak je vidět z obrázku 2, tento materiál strukturou velice připomíná pleteninu, jejíž lící strana má drážky. Teoreticky lze drážkování dosáhnout buďto kalandrováním za zvýšených teplot s použitím profilovaného kalandru, nebo laserovou technologií. Také z obrázku lze posoudit, že vzhledově struktura Fastskin nepřipomíná žraločí kůži. Zvláště je to vidět na příčném řezu materiálu. Vzdálenost drážek, podle [1], je 1,25 mm.

### 1.1.3 LZR Racer

S použitím technologií Fastskin byl vyvinut jiný plavecký kostým – LZR Racer, také značky SPEEDO. Kostým se liší nejenom konstrukcí, ale i materiálovým složením. Na rozdíl od materiálu Fastskin předcházející generace, pro LZR Racer byla použita směs polyuretanu s elastanem [2].

### 1.1.4 Rýhovaný materiál

Jiným inovačním materiálem, který nebyl vyvinut pro plavecký kostým, ale pro biomimetiku pohybu žraloka, je speciální rýhovaný silikonový materiál, znázorněný na obr. 3. Výška rýh – 87  $\mu\text{m}$ , rozpětí mezi rýhami – 340  $\mu\text{m}$ . [1].



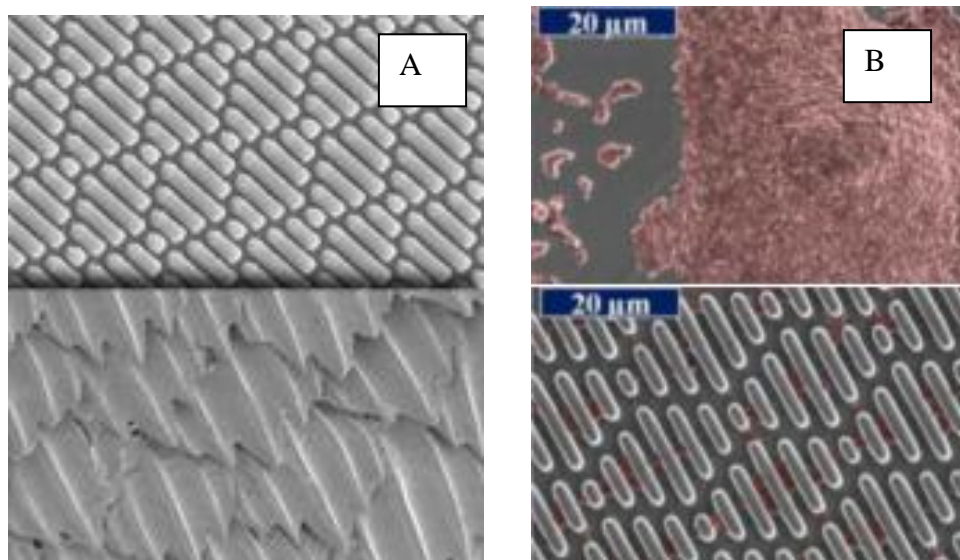
Obr. 3 SEM snímek rýhovaného materiálu. h – výška rýhy, s - rozpětí mezi rýhami [1].

Příčným řezem uvedený materiál velice připomíná pravé žraločí šupiny, což, z hlediska biomimetiky, je úspěšnějším napodobením žraločí kůže než Fastskin. Také rozměrově je tento materiál bližší žraločí kůži než materiál od SPEEDO.

### 1.1.5 Sharklet

Neméně zajímavým biomimetickým materiálem je Sharklet od Sharklet Technologies, Inc., obr. 4. Tento materiál byl vyvinut v roce 2002 ve spolupráci s Americkým Námořním Výzkumným Ústavem (The U.S. Office of Naval Research) s účelem zabránit růstu bakterií a mikroorganismů na trupech lodí [5].



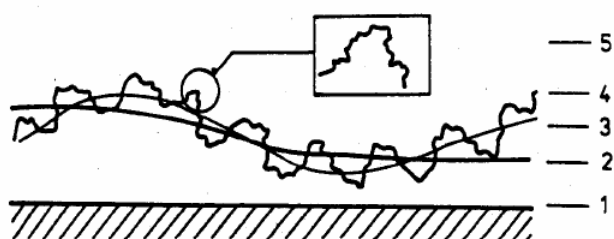


Obr. 4 Porovnání Sharklet a žraločí kůže (A), ukázka nárůstu bakterií na klasickém povrchu lodi a Sharklet (B) [5].

## 1.2 Drsnost povrchu

### 1.2.1 Pojem drsnosti

Drsnost povrchu, také *Struktura povrchu*, přímo souvisí s jakostí obráběného povrchu. V podstatě drsnost není nic jiného, než popis vzhledu povrchu pomocí vhodných geometrických (mikrogeometrie) a rozměrových parametrů. Technologicky není možné vyrobit ideálně rovný a hladký povrch (s nulovou drsností); avšak není to ani žádoucí. Rozdíl mezi drsností a vlnitostí je znázorněn na obr. [6].

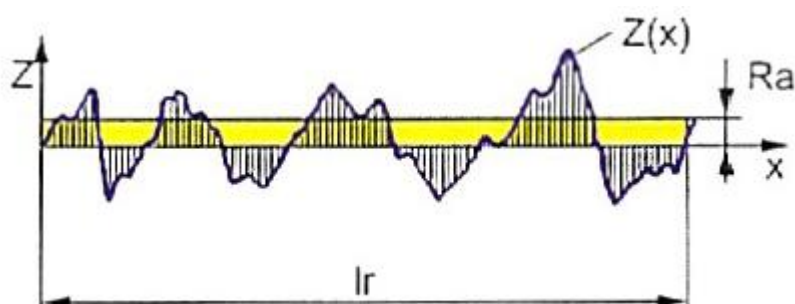


Obr. 5 Schematické znázornění geometrie povrchu v řezu. 1. Ideálně rovný povrch. 2. Odchyly tvaru a polohy. 3. Vlnitost povrchu. 4. Mikroskopické drsnosti. 5. Submikroskopické nerovnosti [6].

### 1.2.2 Hodnocení drsnosti

Stanovení drsnosti povrchu je ve strojírenství jedním ze základních způsobů hodnocení jeho kvality. Vysledná hodnota se porovnává s normou. Tato studie se nebude zabývat podobným porovnáním. Je ale vhodné uvést standardní parametr pro popis drsnosti  $R_a$  - střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu (střední aritmetická úchylka profilu), klasický se uvádí v  $\mu\text{m}$ . Schematické zobrazení parametru  $R_a$  je na obr. 6. Matematicky se vyjadřuje:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

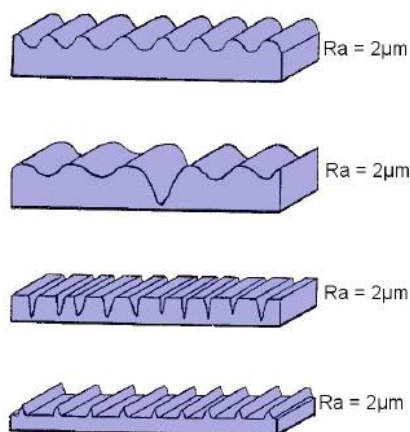


Obr. 6 Schematický popis střední aritmetické hodnoty  $R_a$  [6], kde  $Z$  – rovnice tvarové křivky profilu,  $R_a$  - Střední aritmetická úchylka profilu,  $l_r$  – délka měřeného profilu [6].

Jiným vhodným parametrem je střední kvadratická hodnota drsnosti povrchu  $R_q$  [6].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (2)$$

Dalšími parametry jsou šikmost povrchu -  $R_{sk}$  a špičatost -  $R_{ku}$ . Samotný parametr  $R_a$  nestačí pro přesné vyjádření charakteru povrchu. Příklad toho je znázorněn na obr. 7.



Obr. 7 Různé profily povrchů se stejnou hodnotou drsnosti  $R_a$  [6].

### 1.2.3 Metody hodnocení drsnosti povrchů

Ve strojírenství měření geometrie povrchu se často provádí mechanickým způsobem (pomocí drsnoměrů). S technologickým vývojem se k mechanické metodě připojila metoda optická.

#### 1.2.3.1 Mechanická metoda

Mechanická metoda se provádí pomocí drsnoměru, jak již bylo zmíněno. Princip spočívá v pohybu snímače drsnoměru po povrchu a vytváření dvoudimenzionálního profilu, který odpovídá snímanému povrchu. Moderní drsnoměry nabízejí možnost dotykové a bezdotykové metody, simultánně se snímáním vyhodnocení povrchu a tisku grafů a výsledků. [7]

#### 1.2.3.2 Optická metoda

Optická metoda spočívá buď v pozorování vzorku pod mikroskopem a vizuálním porovnáním se škálou drsností danou ve vzorkovnici, anebo ve snímání povrchu pomocí různých světelných mikroskopů, laseru (TalySurf) apod. a pomocí softwaru vyhodnocování struktury povrchu.

Velkou výhodou optických metod podporovaných počítačem je možnost vytvoření jak klasických 2D profilů (princip profilometru), tak i topografických 3D map povrchu s následnou analýzou. Avšak vytvoření 3D snímků povrchu není možné pro jakýkoliv povrch, viz. Diskuze a výsledky.

## 1.3 Hydromechanika

V experimentální části této práce se budou vytvořené vzorky s různou drsností následně testovat na velikost odporové síly ( $F_{drag}$ ) při působení toku vody. Pro lepší pochopení problematiky stručně popíšeme základy hydromechaniky.

### 1.3.1 Vymezení důležitých pojmů

*Mechanika* je oborem fyziky, který se zabývá studii mechanických pohybů v prostoru a čase. Celý obor lze rozdělit na:

- *Mechaniku tuhých těles*. Zde se studuje pohyb a rovnováha tuhých těles, čili těles, jejichž tvar se působením vnějších sil nemění.
- *Nauku o pružnosti a pevnosti*. Podobor se naopak zabývá studiem soudržných sil v tělesech.
- *Mechaniku tekutin* [8].

*Tekutiny* jsou látky, jejichž elementární částice se navzájem snadno přemísťují. Pro takový typ látek může být charakteristickým pohybem *tečení* a *proudění* [8].

Tekutiny lze také rozdělit na *kapaliny* a *plyny*. Pro kapaliny platí, že jejich objem je velmi málo ovlivněn změnou teploty a tlaku. Plyny naopak jsou velice snadno stlačitelné a tepelně rozpínatelné. Plyny se od kapalin zásadně liší tím, že při styku s ovzduším kapaliny vytvářejí hladinu s povrchovým napětím, občas i kapky. *Ideální kapalina* je kapalina nestlačitelná a bez vnitřního tření, ve skutečnosti ale není reálná. Avšak většina hydromechanických principů je vysvětlena na příkladu ideální kapaliny [8].

*Hydromechanika* je částí mechaniky tekutin, která se zabývá zkoumáním pohybu a rovnováhy tekutin, jejichž nejvýznamnějším představitelem je voda. *Aerodynamika* se zabývá chováním stlačitelných tekutin. Hydromechanika se dále dělí na *hydrostatiku* a *hydrodynamiku*. Hydrostatika zkoumá chování kapalin v klidu, kdežto hydrodynamika v pohybu [8].

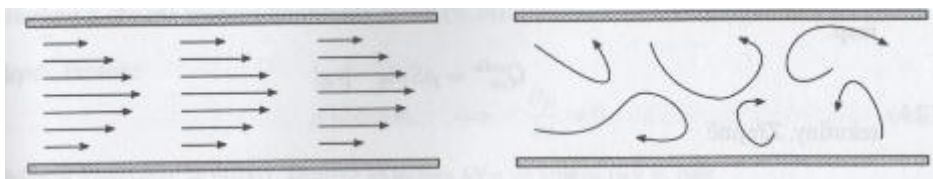
### 1.3.2 Rozdělení proudění

Jak již bylo zmíněno, pro tekutiny je charakteristické tečení a proudění. Při proudění tekutin dochází k:

- neuspořádanému individualnímu pohybu částic
- skupina částic se pohybuje jako celek [9].

Trajektorie částic tekutiny se nazývá *proudnice*. Podle vzájemného uspořádání proudnic v prostoru lze rozlišovat:

- **laminární proudění.** Proudnice laminárního toku jsou navzájem rovnoběžné a při pohybu se částice pohybují podél „svých“ proudnic bez přechodů do jiných vrstev.
- **turbulentní proudění.** Proudnice nejsou rovnoběžné, ale různě pootočené vůči sobě. Při turbulentním proudění částice tekutiny přecházejí mezi vrstvami [9].



Obr. 8 Grafické znázornění laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo) proudění v potrubí [9].

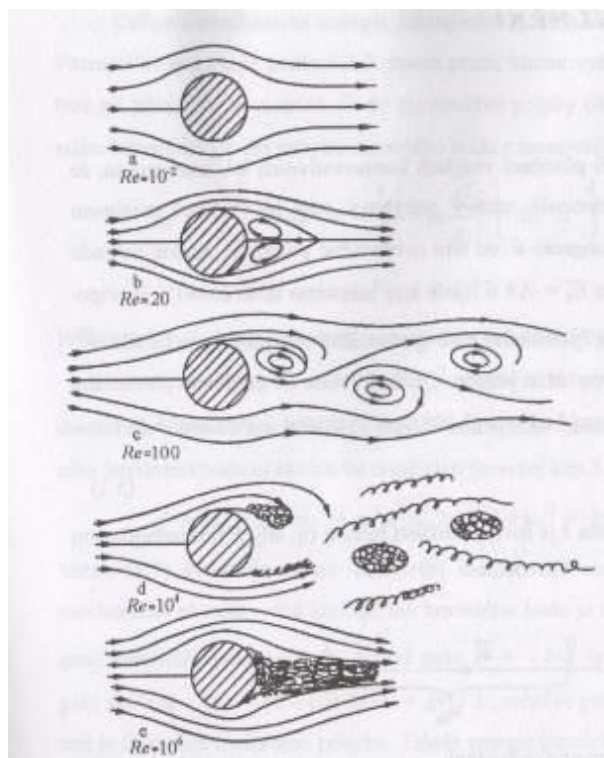
Podle časové závislosti se proudění dělí na:

- **stacionární** neboli **ustálené.** Rychlost proudění je časově nezávislá.
- **nestacionární** neboli **neustálené.** Rychlost je funkcí času.

Podle způsobu pohybu:

- **stacionární** nebo **nevířivé**. Při tomto pohybu částice vykonávají pouze posuvný pohyb, bez vytváření vírů. Je možné pouze pro ideální kapalinu.
- **vířivé**. Dochází také k rotaci tekutiny s následným vytvářením vírů [9].

Grafické porovnání různých typů proudění je na obr. 9 .



Obr. 9 Schematické znázornění možného proudění při obtékání válce. Odshora dolů: laminární proudění, laminární vířivé stacionární, laminární vířivé periodické, turbulentní vířivé periodické, turbulentní vířivé neperiodické [10].

### 1.3.3 Reynoldsovo číslo

Jak jsme již zjistili, proudění může být laminární nebo turbulentní. Irský přírodovědec Osborne Reynolds se zabýval turbulentním prouděním a problematikou přechodu od laminárního proudění k turbulentnímu. On jako první znázornil rozdílné toky pomocí tzv. Reynoldsova pokusu, při kterém se do tekutiny, protékající skleněnou trubkou, vpouštěl tenký proud barviva. Chování barviva v proudu se sledovalo při různých rychlostech proudění. Zjistilo se, že při malých rychlostech se barvivo nerozptýlilo a

teklo pevně vymezeným pásmem. Při vyšších rychlostech se barvivo rychle promíchalo s tekoucí vodou [8].

Při detailním zkoumání problematiky Reynolds objevil závislost mezi hustotou tekutiny, viskozitou tekutiny, střední rychlostí proudění a průměrem potrubí. Tomuto poměru se říká *Reynoldsovo číslo* a je to bezrozměrná veličina.

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta} \quad (3)$$

kde  $Re$  – Reynoldsovo číslo [-]

$\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\bar{v}$  - střední rychlost toku [ $\text{m/s}$ ]

$D$  – průměr trubice, kterou tekutina proudí

$\eta$  – viskozita tekutiny [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] [9].

Z rovnice (3) plyne, že pro různé veličiny  $\rho$ ,  $\bar{v}$ ,  $D$ ,  $\eta$  lze najít takový poměr, že  $Re$  pro ně bude přibližně stejné, což znamená, že dojde k podobnému typu obtékání a proudění. Na obr. 9 jsou vidět různé typy obtékání s rostoucím Reynoldsovým číslem [10].

Experimentálně byla zjištěna kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{kr} = 2320$ . Lze ji považovat za hodnotu, určující rozhraní mezi laminárním a turbulentním prouděním v potrubí kruhového průřezu. Rychlosti, při které dochází k přechodu od laminárního k turbulentnímu proudění, se říká *kritická rychlost* [8].

Znamená to, že v potrubí s větším průřezem se turbulentní proudění projeví při menších rychlostech toku, než v potrubí s menším průřezem. Také z toho plyne, že i když při stejné rychlosti toku tekutiny v úzkém potrubí je proudění laminární, v širokém může dojít k turbulentnímu.

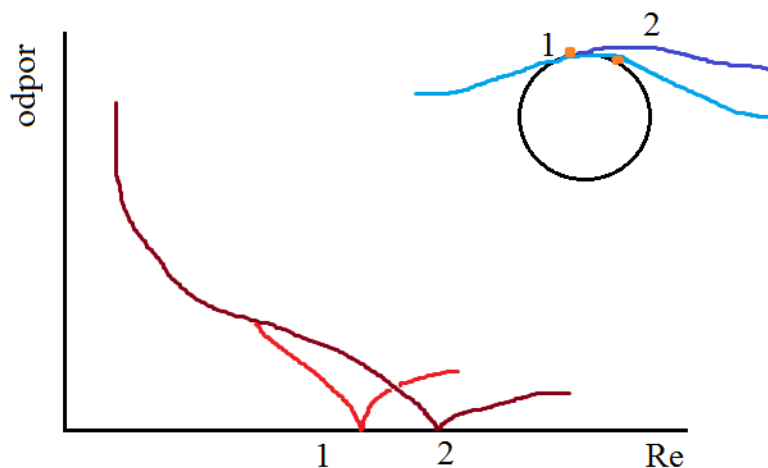
Nelze ale chápat přechod od laminárního proudění k turbulentnímu (a opačně) takto definitivně. Hranice přechodu není jistá a říká se jí *přechodná oblast* nebo *kritická oblast*.

Výše popsaná teorie platí pro potrubí. V případě plavání, se plavec nenachází v žádném potrubí, ale poblíž vodní hladiny. Proto je vhodné uvést, co se děje v tomto

případě s prouděním. Širokým, dlouhým (potenciálně nekonečným) a hlubokým nádobám se říká *koryto*. Při plavání v bazénu se plavec právě nachází v korytě a jeho Reynoldsovo číslo bude řádově větší, než pro případ s potrubím. Znamená to, že při pohybu za plavcem bude vznikat turbulentní proudění. Síle, která bude brzdit jeho pohyb, se říká *odporová síla*.

### 1.3.5 Úplav

Při obtékání tělesa tekutinou dochází k odtržení proudu od obtékané stěny. Takto vzniká ihned za tělesem prostor naplněný víry. Tomuto prostoru se říká *úplav*. V úplavu se laminární proudění mění na turbulentní. Úplav závisí na tvaru tělesa, rychlosti pohybu tělesa vůči tekutině, viskozitě tekutiny a také na drsnosti povrchu tělesa [8].



Obr. 10 Posun  $Re$  vzhledem k členitosti povrchu.

Přechodu 1-2 se říká zmenšení úplavu. Zmenšení úplavu lze dosáhnout nejenom členitostí povrchu (množstvím částic), ale i typem drsnosti (vzorem).

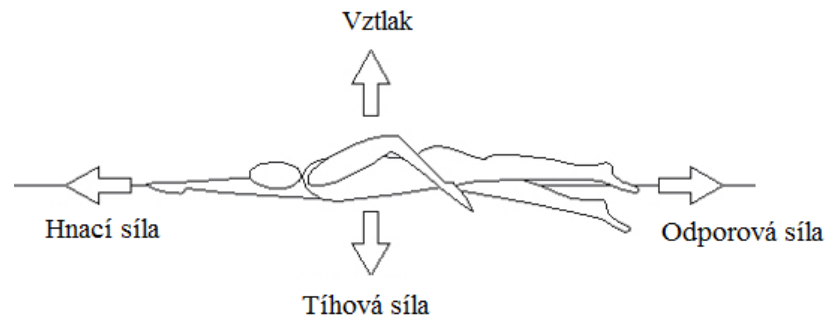
### 1.3.6 Odporová síla $F_{drag}$ (drag force)

Odporová síla je součástí odporu prostředí, což je soubor sil, kterými tekutina působí na tělo při jeho pohybu stejným směrem, jako proudění tekutiny. Složky odporu prostředí:

- pasivní odpor. Je to odpor, který se vyskytuje protahováním tělesa tekutinou
  - odpor tvarový, nebo profilový (form, drag), závisí na tvaru tělesa a poloze tělesa ve vodě



- odpor tření (friction drag). Tady se myslí tření mezi tělesem a tekutinou
- aktivní odpor. V podstatě je to odpor, způsobený pohybem ve vodě
  - odpor způsobený formováním vln
  - odpor způsobený dynamickým vztlakem
  - jiné [11]



Obr. 11 Schematické znázornění působících sil na plavce při plavání [12].

Tvarový odpor zkoumal Newton. Zkoumal ho ale pro rovinnou desku, taženou v klidném prostředí konstantní rychlostí. Zobecněním pro libovolný tvar tělesa lze vyjádřit rovnice odporu ve tvaru:

$$F_{tv} = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (4)$$










kde  $F_{tv}$  - síla tvarového odporu [N]

$C_x$  - součinitel tvaru a povrchu tělesa, neboli odporový součinitel [-]

$\rho$  - hustota tekutiny [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  - rychlost pohybu tělesa vůči tekutině [m/s]

$S$  - plocha řezu tělesa [ $\text{m}^2$ ]

Tvar	Cx	Tvar	Cx
	0.47		0.82
	0.42		1.15
	0.50		0.04
	1.05		0.09
	0.80		

Obr. 12 Závislost odporového součinitele na tvaru tělesa. Šipkou je ukázán směr toku tekutiny [13].

### 1.3.7 Vztlková síla (buoyancy)

Archimédův zákon: Těleso ponořené do tekutiny je nadlehčováno silou o velikosti tíhy vytlačené tekutiny a opačného směru. Matematický zápis:

$$\vec{F}_A = -\vec{g}\rho_{tek}V \quad (5)$$

kde  $F_A$  - vztlková síla [N]

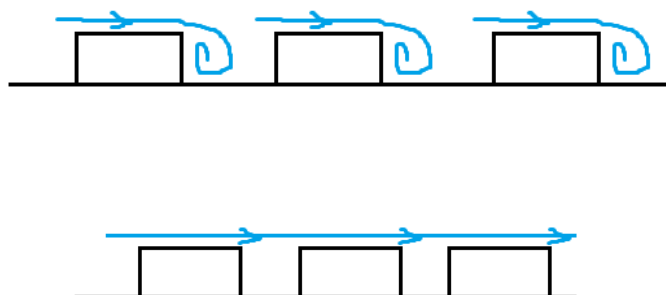
$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

$\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$V$  – objem [ $\text{m}^3$ ]

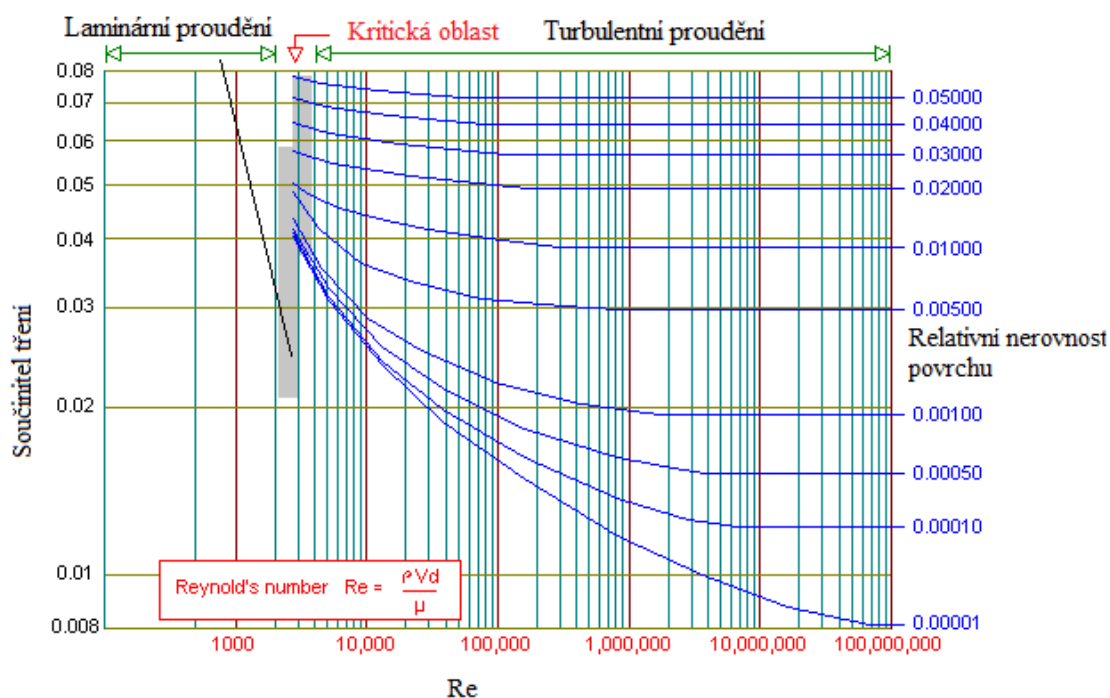
### 1.3.8 Vliv drsnosti povrchu

Při toku tekutiny po rovinné desce mohou nastat 2 případy, které jsou graficky znázorněny na obr. 13.



Obr. 13 Grafické znázornění možnosti chování toku na povrchu s odlišnou drsností.

Jak je vidět z obrázku, při různé drsnosti se na povrchu mohou vytvářet víry. Právě na tomto principu funguje žraločí kůže. V turbulentním proudění žralok plave ještě rychleji díky „vlastnímu pohonu“. Ale ve většině případů víry na povrchu textilií způsobují drastické zpomalení. Proto obecně v turbulentním proudění platí, že čím je hladší povrch, tím je menší odpor.



Obr. 14 Moodyho Graf [14].

Z Moodyho grafu je vidět, že při různé drsnosti povrchu lze získat různé odporové síly. Avšak pro nás je zajímavá přechodová oblast (od laminárního proudění k turbulentnímu). Jak je vidět, přechodová oblast je dosti rozsáhlá, nikoliv jednoznačná. Právě v této oblasti, pomocí úpravy drsnosti povrchu lze teoreticky získat velký pokles odporové síly. Této oblasti se také říká „oblast nejistoty“ a do dnešní doby není chování tekutiny v přechodu jednoznačně vysvětleno [8].

**Závěr:** Teoreticky, pomocí drsnosti povrchu, lze snížit odpor vůči toku, tudíž odporovou sílu. Proto lze získat reálné přechodové hodnoty plavce na různých částech těla a podle lokální rychlosti navrhnout vhodnou úpravu povrchu pro dosažení vhodné drsnosti, která sníží výskyt mikrovířů (i když tuto problematiku lze zkoumat více do

hloubky, například lze víry také použít ve prospěch plavání, viz. příklad žraloka) a zmenší úplav. Taková textilie může výrazně zvýšit rychlost a efektivnost plavce.

### 1.3.9 Metody měření odporové síly

#### 1.3.9.1 Anemometrie

*Anemometrie* je souhrn metod experimentální mechaniky tekutin, umožňující měřit rychlostní pole proudící tekutiny. V posledních letech dosáhla špičkové přesnosti pomocí použití metod, pracujících na opto-elektronickém principu s využíváním laserového záření. Mezi tyto metody patří:

- LDA – Laser-Doppler anemometry
- PDA – Phase Doppler anemometry
- L2F – Laser two-focus anemometry
- PIV – Particle image velocimetry
- 3D PIV [15].

Všechny výše uvedené metody používají laser pro snímání pohybu tekutin a proto se jim říká „laserové anemometrie“. Jsou to bezdotykové metody a jedná se o měření rychlosti media pomocí v něm rozptýlených mikroskopických částic (často například postříbřeného skla). Velmi vysoké požadavky jsou kladeny na průhlednost tekutiny a optický přístup do měřeného prostoru. Výhodou těchto metod je nezávislost měření na okolních podmínkách, jako teplota, vlhkost, tlak a jiné [15].

V průběhu vývoje laserové anemometrie se výrazně zlepšila metoda zpracování výstupního signálu a jeho kvalita. Odstranění šumu je také na dobré úrovni. Moderní anemometry jsou nabízeny s vhodným softwarem pro okamžitou analýzu naměřených dat, vyhodnocování chyb měření, a statistické zpracování. Často lze vytvořit animaci pohybu tělesa v tekutině a virtualizovat 3D proudnice [15].

Pomocí anemometru lze nasnímat rychlostní profily velice blízko měřenému povrchu, což poskytuje unikátní možnost pro sledování vlivu drsnosti povrchů na odporovou sílu. Také lze přesně stanovit, o jaké proudění se jedná a jestli tok na

povrchu, například textilie, vytváří víry. Díky tomu lze lépe pochopit síly, které působí na těleso při plavání.

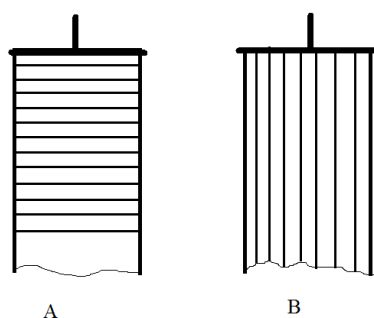
### 1.3.9.2 Pokus s volnou fólií („flapping foil“)

Je vhodné uvést praktické použití anemometrie pro stanovení odporové síly. Jako příklad byl zvolen pokus Johannese Oeffnera a George V. Laudera z roku 2011 [1].

Účelem experimentu bylo pomocí robota porovnat následující materiály při různém pohybu ve vodě:

- pravou žraločí kůži
- obroušenou žraločí kůži (hladkou)
- Speedo Fastskin II
- Speciální silikonový rýhovaný materiál [1.1.4].

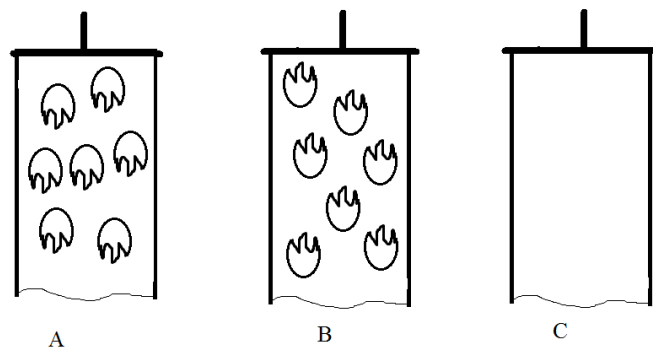
Pokus se prováděl jak s pevně umístěnými, tak i s flexibilními materiály. Na obr. 15 je ukázána poloha drážek materiálu, upevněného v rámu.



Obr. 15 Příčné (A) a podélné (B) umístění drážek Fastskin II a rýhovaného materiálu vůči pohybu (vůči toku).

Pro žraločí kůži bylo umístění v rámu následující:

- zuby šupin otočené stejným směrem, jako směr proudu tekutiny (A)
- zuby šupin otočené opačným směrem, jako směr proudu tekutiny (B)
- kůže, obroušená brusným papírem (C).



Obr. 16 Umístění šupin žraločí kůže v rámu.

Vzorky všech materiálů byly přilepeny pomocí speciálního lepidla na podkladovou fólii.

Pro experiment byl speciálně vyvinut robot, který zajistil správný pohyb zkoumaného materiálu ve vodě v několika režimech. Byla použita vodní nádrž, videokamera FastCam 1024 PCI a anemometr [1].

Zpočátku byl ve vodní nádrži pořízen videozáznam pohybu malého žraloka *in vivo*. Pak byla provedena analýza jeho pohybu na počítači s následným vytvořením pohybového modelu, který se aplikoval pomocí robota na fólie ve vodě. Pro pokus s fóliemi se do vodní nádrže přidalo 6 g postříbřeného skleněného prášku. Po celou dobu experimentu byl prášek rovnoměrně rozptýlen po celé nádrži. Při pohybu fólie byla celá nádrž nasvícena 10W kontinuálním argonovým laserem a pomocí rychloběžné kamery se získal videozáznam pohybu částic prášku [1].

Pokus se opakoval třikrát pro každý materiál pro pevné i flexibilní umístění zkoumaných materiálů.

#### **Výsledek pokusu:**

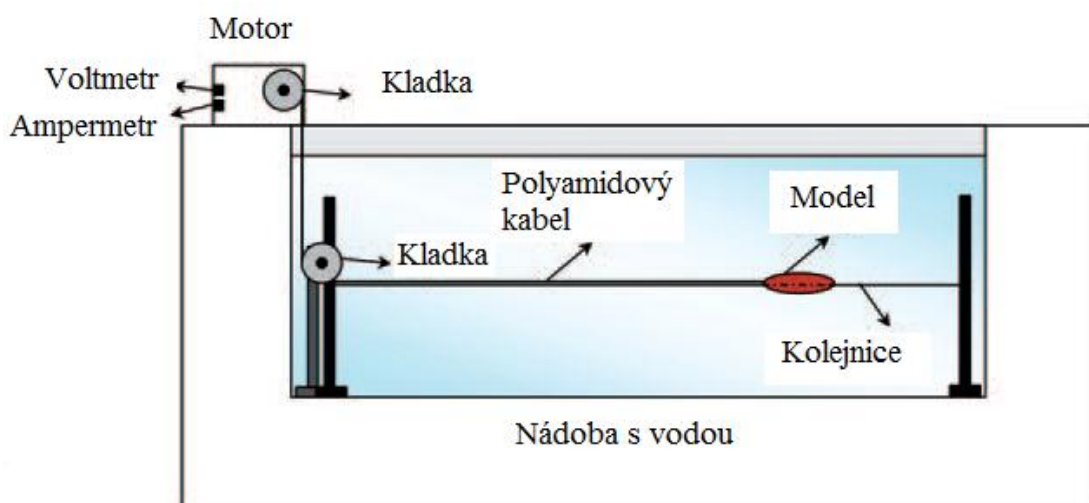
- při zkoušce s pevně umístěnými fóliemi žraločí šupiny neprokázaly žádné zlepšující a zrychlující účinky, spíše naopak zpomalovaly průtok vody po povrchu vzorku.
- při zkoušce s pevně umístěnými fóliemi, měla obroušená žraločí kůže lepší výsledky, než kůže s šupinami.
- při zkoušce s flexibilně umístěnými fóliemi, žraločí kůže zlepšila plavecký výkon v průměru o 12,3% v porovnání s obroušenou kůží.

- silikonový materiál a materiál Fastskin mohou zlepšit plavecký výkon, ale pouze při určitém typu pohybu a určitých rychlostech [1].

Z těchto výsledků lze opět teoreticky předpokládat, že se dá vytvořit plavecký kostým s různou strukturou a drsností povrchů pro různé části tohoto kostýmu. Pomocí analýzy pohybu při plavání lze do detailu rozebrat proudění vody po těle plavce při pohybu, a následně navrhnout vhodné umístění textilních materiálů na plaveckém obleku pro zvýšení plaveckého výkonu.

### 1.3.9.3 Měření pasivního odporu

Abasi S., Nasrollahi T. a další spoluautoři článku „Construction of drag force measuring system to characterize the hydrodynamics properties of swimsuit fabrics“ se zabývali konstrukcí zařízení pro testování pasivního odporu textilií pro plavecké kostýmy [2]. Testování se provádělo ve vodní nádrži, vybavené podle obr. 17.



Obr. 17 Schématické znázornění systému pro měření pasivního odporu [2].

Princip experimentu je následující: Dřevěný model se protahuje vodní nádobou po kolejnici pomocí motoru 40 cm pod vodou. Model je spojený s motorem polyamidovým kabelem prostřednictvím kladek. K motoru je připojen voltmetr a ampérmetr. Systém je kalibrovaný. Měřil se výkon motoru a byla stanovena závislost mezi výkonem motoru a odporovou silou [2].

Jako první se provedlo měření odporové síly dřevěného modelu. Poté byl model potažený povlakem z textilního materiálu. Použité materiály, vše pleteniny:

- 96,5% polyamid 6 a 3,5% elastan
- 100% polyamid
- 100% polyester.

Povlaky se ušily ve směru sloupků a řádků pletenin. Následně se dřevěný model potahoval povlaky a byl protahován vodou při rychlostech 0,12 m/s, 0,21 m/s, 0,24 m/s, 0,40 m/s [2].

**Výsledky:** Podle statistické analýzy má polymerní materiál velký vliv na odporovou sílu. Největší odpor měl polyester. Je to možná způsobeno bublinkami vzduchu, které byly přítomné na pletenině v průběhu zkoušek [2].

**Rozbor experimentu:** v článku [2] není žádná zmínka o působení jiných sil na povlečený model, jako vztlaková síla a tíhová síla. Proto naměřené hodnoty podléhají diskuzi.

#### **1.3.9.4 Zkouška s živým plavcem (active swimmer test)**

Pasivní odpor textilií je velice důležitým faktorem při konstrukci plaveckých kostýmu. Avšak důležitější je reálné srovnání vlivu plavek na výkon plavce. Pro takové zkoušky je nutné pozorovat plavání reálného člověka. Proto jsou v bazénu umístěny kamery a čidla pro sledování rychlostí a jiných charakteristik. Do detailu se tento způsob rozebírat nebude [12].

### **1.4 Možnosti úpravy povrchů fólií**

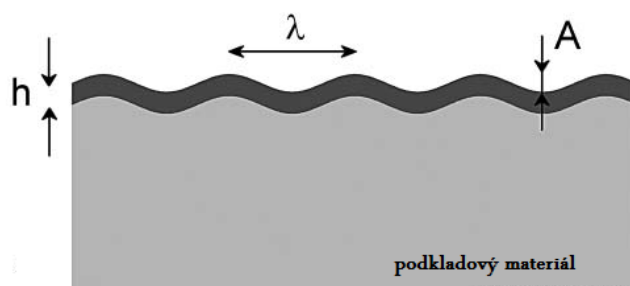
Jedním z cílů této práce je zkoumat možnosti dosažení různých povrchů na textilních fóliích. Jako vybrané metody budou popsány úpravy pomocí CO<sub>2</sub> laseru, oxidací plazmou, tepelným zpracováním, metodou potiskování povrchu, nánosem částic



na povrch a chemickou úpravou. Pomocí výše uvedených metod lze dosáhnout mikro či dokonce i nano-drsných povrchů.

Před uvedením způsobů povrchových úprav je vhodné zmínit původní model zkoumání vrásnění a mikro-povrchů.

Prvním modelem byla lidská pokožka a rostliny. Pro experimentální účely byl vyvinut membranový model: tenké fólie spojené s pružnou podložní vrstvou. Oblíbeným materiálem pro spodní vrstvu je polydimetylsiloxan (PDMS) který je potažený pevným polymerem nebo kovem [16].



Obr. 18 Vrásnění na vzorku tenké fólie s pružným podkladem.  $h$  – tloušťka membrány,  $A$  – amplituda,  $\lambda$  – periodičita [17].

Chemický vzorec PDMS je  $(C_2H_5OSi)_n$ . Zpočátku se vrásnění PDMS pozorovalo na kovových fóliích, hlavně z hliníku, zlata a platiny. Pozděj byl jako nanášený materiál na pružný podklad použit polyethylentereftalát.

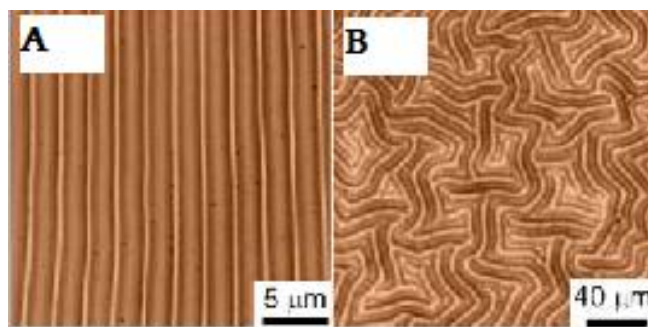
## 1.4.1 Úprava pomocí laseru

### 1.4.1.1 Laserová technologie

Jedním z největších a nejdůležitějších technologických vynálezů minulého století je laser. Postupný vývoj laserů přináší lidstvu stále nové možnosti využití této techniky. Kromě toho, že práce s laserem je rychlá, snadná a přesná, laserová technika se prokázala jako velice enviromentálně šetrná, což v dnešní době je velmi důležitým aspektem průmyslové výroby.

Povrchová úprava materiálu pomocí laseru způsobuje fyzikální a chemické změny povrchu polymerního materiálu, buď vlákna nebo fólie. Laserová metoda je relativně nová, avšak textilie se obvykle zpracovává UV laserem a málokdy se objeví zmínka o úpravě povrchu textilií nebo polymerů infračerveným pulzujícím CO<sub>2</sub> laserem.

Nejjednodušším vzorem, který lze vytvořit pomocí laseru na povrchu je přímočará drážka. Složitějším úkolem, avšak stejně dosažitelným, je vzorové rytí, obr. 19 [18].

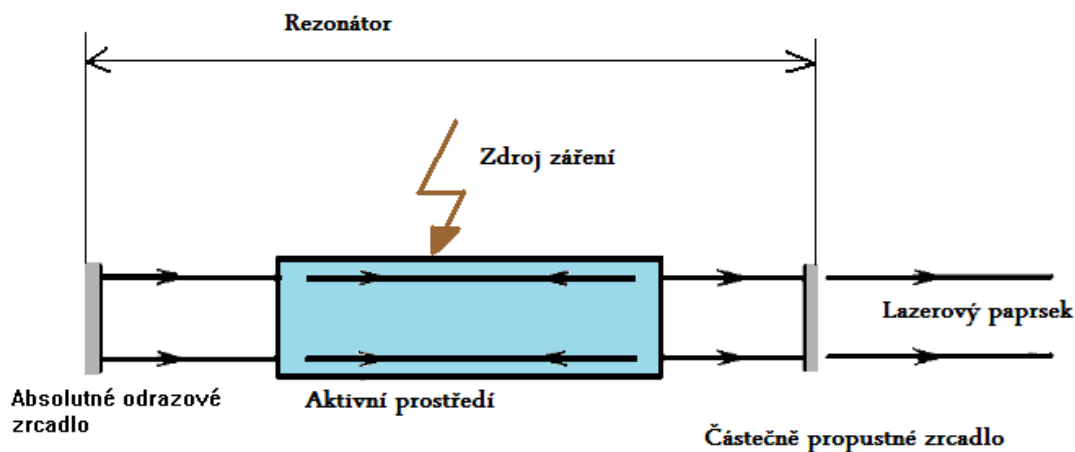


Obr. 19 Možnosti vzorování laserem: (A) přímočaré rytí, (B) vzorované rytí pomocí laseru na PDMS podkladu s fólií [18].

Změnou frekvence a výstupní energie laseru lze měnit hloubku drážkování, šířku drážky a nastavením trajektorie pohybu laseru lze vytvářet nejenom rovnoběžné vzory [18].

#### 1.4.1.2 Všeobecná charakteristika a oblasti použití

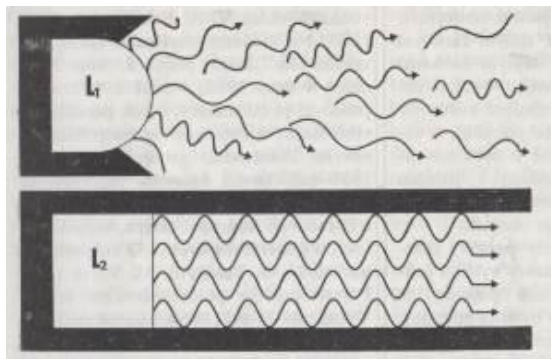
Laser je zdroj koherentního monochromatického optického záření se stimulovanou emisí. Obrovskou výhodou je malá divergence (malá rozbíhavost svazku). Název je akronymem od „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, tj. „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Skládá se z aktivního prostředí, rezonátoru a zdroje energií [19].



Obr. 20 Princip laseru.

K zesílení světla dochází opakovaným průchodem fotonů aktivním prostředím se specifickými vlastnostmi. Na výstupu je laserový paprsek upravován systémem čoček pro zvýšení kvality a úpravu průměru svazku. Ve výsledném paprsku je soustředěno velké množství energie [19].

Rozdíl mezi obyčejným světelným zdrojem a laserem je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21 Světelné paprsky žárovky (L1) a koherentního záření – laseru (L2) [20].

Právě díky tomu, že laser je zdrojem koherentního záření, laserový paprsek je možno soustředit na velmi malou plochu s dosažením velkých hustot energie. Například není problém pomocí laseru za zlomek vteřiny bodově a plošně dosáhnout bodů tání a varu ozařovaného materiálu. Materiál se z místa zpracování odstraní samovolným odpařováním nebo vyfouknutím [20].

První laserový paprsek byl vytvořen v roce 1960 a v této době bylo pro tento vynález málo oblastí použití. Nicméně, postupně řada fyziků zkoumala další možnosti použití laserového svazku, např. pro svařování, rytí, tavení, řezání a označování [21].

V dnešní době se lasery používají pro:

- Lékařské účely: oční operace, kosmetické operace, ve stomatologii, k ošetření jizev a strií, odstraňování tetování atd.
- Řezání a svařování; velký význam ve strojírenském průmyslu. Kupříkladu, pomocí CO<sub>2</sub> infračerveného laseru se dá svařovat nerezovou ocel a měď, což je pro klasické svařování nemožným úkolem.
- Geodetické účely: mapování, měření vzdálenosti.
- Textilní průmysl: oddělovací proces, spojovací proces, vzorování, označování.
- Komunikace: vysílání signálu optickými kabely pomocí laseru, vypalování CD, DVD, Blue-Ray.
- Tepelné zpracování materiálů: lokální kalení a žíhání kovů [22].

#### 1.4.1.3 Typy laserů

Podle typu aktivního prostředí se lasery dělí na 4 základní typy:

1. Pevnolátkové.
2. Plynové.
3. Polovodičové.
4. Barvivové.

Podle spektra paprsku laseru:

1. UV lasery (10-360 nm).
2. Emitující ve viditelné oblasti (360-780 nm).
3. IR lasery (780 nm-1mm).

Podle režimu práce:

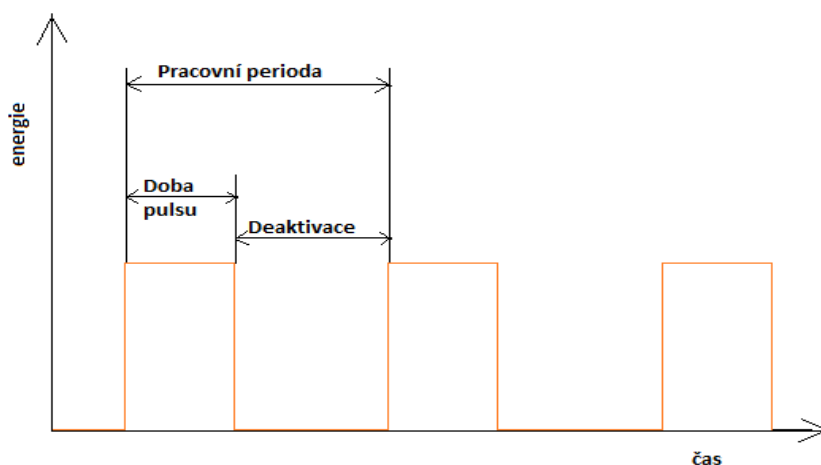
1. Kontinuální (nepřeržitá generace záření).
2. Pulzní (pulzy s vysokou opakovací frekvencí).
3. Impulzní (vysoce energetické plyny s nízkou opakovací frekvencí) [22]

#### 1.4.1.4 Parametry laseru

V této podkapitole bude zmíněno jen několik parametrů, nezbytných pro pochopení principu fungování laserového zařízení a experimentu s laserem v experimentální části.

*Výkon laseru* – množství vyzařené energie za určitý čas. Jednotkami jsou watt (W). Obecně, výkon je dán množstvím práce, vykonaným během jednotky času.

*Pracovní cyklus* – poměr mezi dobou záblesku laseru (doba pulsu) a délkou pulsní periody, bezrozměrný parametr, avšak pro laser nejvýše 50%, obr. \_22.



Obr. 22 Schématické znázornění pracovního cyklu laseru.

*Doba pulsu* (doba záblesku laseru) – čas vyzařování jednoho pulsu. Jednotlivé záblesky mohou trvat milisekundy (ms), mikrosekundy ( $\mu$ s), nanosekundy (ns) a dokonce i pikosekundy (ps), v závislosti na druhu laserového zařízení a možnosti parametrů nastavení.

*Frekvence* – počet vyzařování za sekundu. Jednotky – kilohertzy (kHz). Je inverzní hodnotou pracovní periody [20].

#### 1.4.1.5 CO<sub>2</sub> laser

Infračervený CO<sub>2</sub> laser byl vynalezen jako jeden z prvních v roce 1964 a je jedním z nejvíce používaných. Aktivním prostředím pro zesílení paprsku je oxid uhličitý. Také se může přidávat helium, pro zesílení výstupní energie, a dusík. CO<sub>2</sub> laserový svazek je infračerveným světlem s vlnovou délkou 9,4 – 10,6  $\mu$ m, je homogenní, s

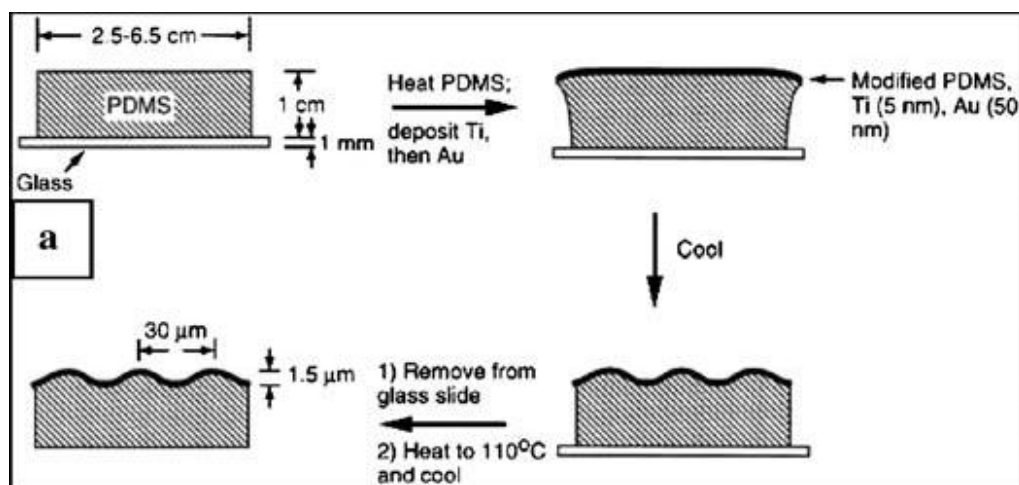
téměř nevýznamnou rozbíhavostí. Jsou možné dva pracovní režimy: kontinuální a pulzní. Velkou výhodou popisovaného laseru je vysoká účinnost. Je pravda, že do laseru musíme přidat více energie, než získáme. Na druhou stranu získáme paprsek velmi specifických a výhodných vlastností [22].

Tento typ laseru je široce používán pro řezání jak textilií, tak plastů a kovů. Kupříkladu lze CO<sub>2</sub> laserovým paprskem řezat titanový plech a obrábět ocelové části strojů [20].

V textilním průmyslu nabývá většího a většího významu. Barvení, bělení a povrchové úpravy textilií se obecně provádí s využitím chemikálií, což je velmi náročné na okolní prostředí a vyžaduje velkou spotřebu vody a následně její náročné čištění. Ve výsledku použití laserových technologií přibývá a jsou dále vyhledávány nové aplikace laserů v textilním průmyslu [23].

#### 1.4.2 Úprava pomocí tepelného zpracování

Tato metoda je nejstarším ze známých způsobů dosažení vrásnění na membránách s podkladem. Princip spočívá v ohřevu pružného podkladu, pro příklad použijeme již zmíněný PDMS, nánosu fólie a ochlazení. Popsaný způsob je dostatečně jednoduchý a také praktický. Proces je zobrazen na obr. 25.



Obr. 23 Schéma postupu tepelného zpracování PDMS s nánosem kovů a ochlazením na pokojovou teplotu [16].

Místo kovů lze použít polymerové fólie. Takto vypracovaný polotovar se dá považovat za konečný výrobek, nebo může být využit, s případným nánosem kovů, jako tiskací razítka a bubny pro vytváření mikropotisků pro textilní výrobky a strojírenský průmysl.

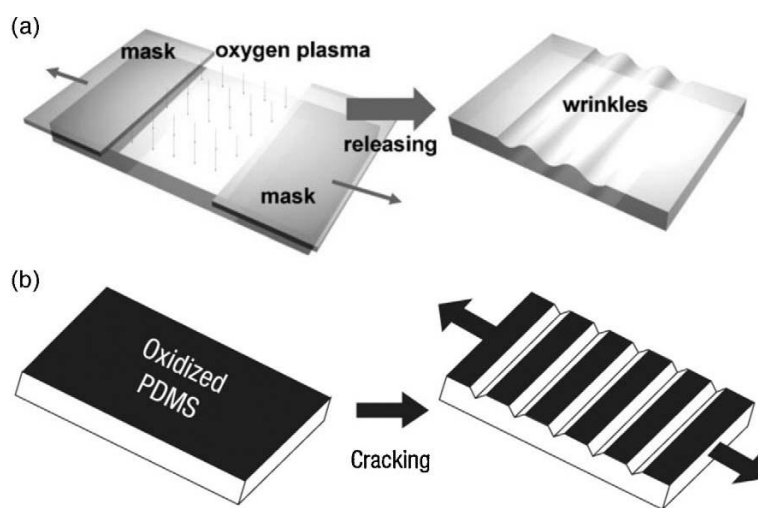
### 1.4.3 Úprava pomocí $O_2$ plazmy a UV záření

Na rozdíl od tepelného zpracování, ošetřování plazmou, UV zářením a ozonem, nevyžadují potažení pružného substrátu polymerní fólií nebo kovem. Pro tyto metody se dá použít elastický a viskoelastický materiál. Při kontaktu s plazmou nebo jiným médiem dojde ke ztuhnutí kontaktní vrstvy [18].

Metoda dosažení drsnosti povrchu pomocí  $O_2$  plazmy:

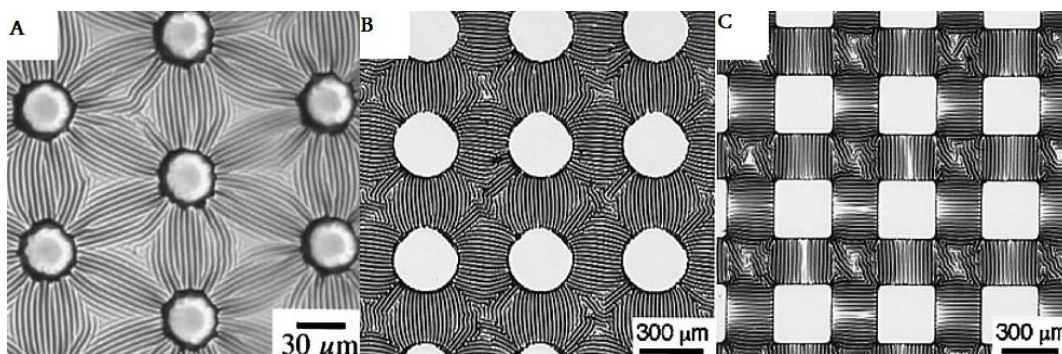
1. Ohřívání PDMS pro rozšíření.
2. Ošetření povrchu vrstvy PDMS plazmou, napínání vzorku. Zároveň se formuje tenká povrchová vrstva tužší křemenité (silica-like) látky.
3. Chlazení materiálu pro vytvoření napětí [18].

Ve výsledku se získá vlnitý povrch, obr. 24(a).



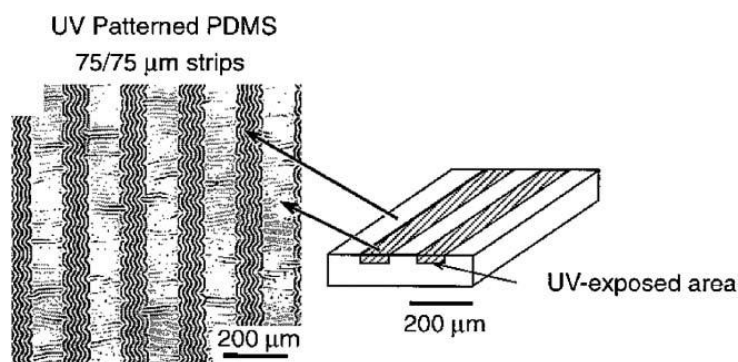
Obr. 24 (a) Oxidace plazmou za zvýšených teplot se simultánním jednosměrným napínáním vzorku. (b) Oxidace plazmou za stálých teplot s následným tvořením trhlin na povrchu vzorku [18].

Jiným postupem je ošetření plazmou bez ohřátí s následným protažením. Ztuhlý povrch praskne a vzniknou rýhy, obr. 25. Při vícesměrném následujícím protahování vznikne vzorované vrásnění. Při ošetřování povrchu plazmou lze použít různě profilované masky. Ve výsledku bude plazmou upravená pouze nepřikrytá část vzorku. Ukázky rozmanitých povrchu získaných výše uvedeným způsobem jsou na obr.7 [17].



Obr. 25 Vrásnění na PDMS vzorcích, dosažené ošetřováním povrchů plazmou a s aplikací masek s odlišným profilem [17].

Na podobném principu, jako je zpracování vzorků plazmou, funguje i opracování UV světlem. Příklad je uveden na obr. 26 s použitím masky.



Obr. 26 Vrásnění na PDMS pomocí UV záření s aplikací masky[17].

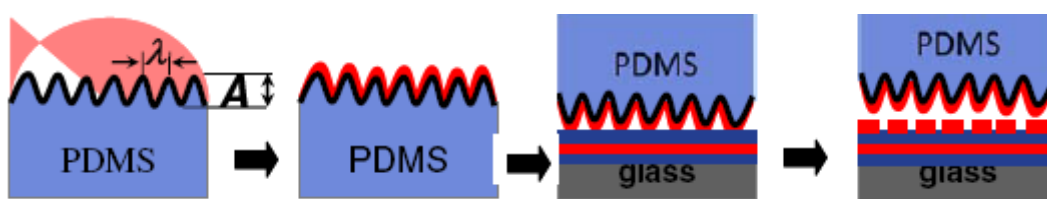
#### 1.4.4 Úprava metodou potiskování

Jedním z nejvýznamnějších a neméně zajímavých použití vrásněných povrchů je takzvané mikrokontaktní tiskění (micro contact printing, mCP) [16].



Postup potištění:

1. Metodou tepelného zpracování pokoveného PDMS je dosaženo pravidelné vrásnění na povrchu. Lze také použít materiál zpracovaný plazmovou metodou.
2. Nanášení vrstvy tiskacího materiálu na zvrásněný povrch.
3. Přenos nanesené vrstvy tiskacího materiálu prostřednictvím mCP na povrstvované sklo.
4. Po odstranění razítka zůstává na upraveném skle chemický nátěr, obr. 9.



Obr. 27 Schéma mikro potiskování. [16].

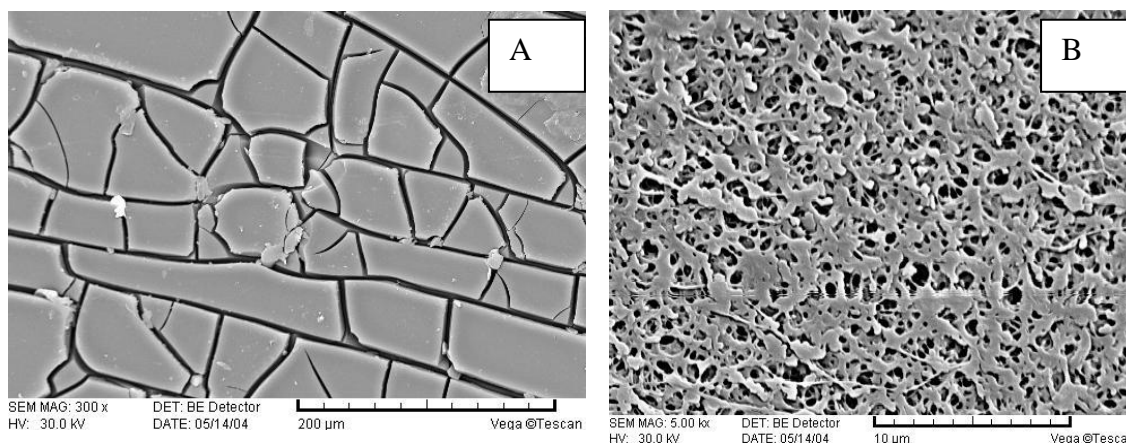
#### 1.4.5 Úprava nánosem částic na povrch

Příkladem takové metody je výroba brusného papíru. Na textilní podklad se nanáší pojivo a následně abrazivní materiál nebo přímo připravená směs pojiva a abrazivního materiálu.

Dalším možným způsobem je nanášení práškového polymeru nebo pojivých vláken s následným částečným roztavením pro upevnění na podkladu.

#### 1.4.6 Chemická úprava

Je zřejmé, že možnosti chemických úprav jsou velice rozsahlé. Pro tuto práci lze zdůraznit možnost úpravy polyesterové fólie kyselinou sírovou (viz. Experimentální část), obr. 28. Tato metoda je zatím málo zkoumaná.



Obr. 28 PES fólie zpracovaná 10 min v 70% roztoku kyseliny sírové (A); PES fólie zpracovaná 3 sec v 80% roztoku kyseliny sírové (B) [24].

#### 1.4.7 Použití upraveného materiálu

Materiál s periodickými mikro-vráskami lze použít pro rozmanité účely. Mezi ně patří tlaková čidla, substráty pro regulování směru růstu buněk a krystalů, razítka pro mikrotisk, části přístrojů s mikrofluidním tokem, funkční povrchové úpravy apod. [17].

Pravidelně vzorované povrchy mohou poskytnout speciální hydrodynamické nebo aerodynamické vlastnosti, jako redukce turbulentního proudění, jako například u žraloků a vážek. Materiály s povrchovým mikro-vlněním (délka vlny je řádově v mikrometrech) vykazují smáčivé a samočistící vlastnosti, kterým se říká „lotos effect“ [16].

Tato práce se zabývá použitím povrchově upravených fólií pro zjištění některých hydrodynamických vlastností vyrobených materiálů a stanovení závislosti mezi těmito vlastnostmi a strukturou (drsností) povrchů.

## 2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo připravit vzorky s různou drsností povrchů, na základě vypracované rešerše a vlastních teoretických znalostí navrhnout experiment pro měření odporové síly vzorků v toku vody a stanovit možnou závislost mezi drsností povrchu a odporovou silou.

### 2.1 Použité materiály

V této diplomové práci byly použity následující materiály:

1. PES fólie. Plošná hmotnost – 110 g/m<sup>2</sup>. Tloušťka – 90 μm.
2. 2 druhy prášku na pojení netkaných textilií. Velikost zrn:
  - a. Prášek 1: 300-350 μm
  - b. Prášek 2: 150-180 μm
3. Bikomponentní vlákna pro pojení netkaných textilií.
4. Brusný papír na podkladu z bavlněné tkaniny. Hrubost použitých papírů:
  - a. 30 zrn/cm<sup>2</sup>. Velikost zrn: největší 1mm
  - b. 150 zrn/cm<sup>2</sup>. Velikost zrn: 90-120 μm
  - c. 280 zrn/cm<sup>2</sup>. Velikost zrn: 50-60 μm

### Polyester (PES)

Klasická polyesterová vlákna, nebo polyetylentereftalát, vzniká esterifikací kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Polyesterová vlákna se skládají z krystalické a amorfnní fáze. Chemický vzorec:



Vlastnosti klasického polyesteru:

- teplota zesklenění: 77 - 80 °C
- teplota měknutí: 230 °C
- teplota tání: 258 °C
- pevnost: 3.8 – 7.2 cN/dtex

- dobrá odolnost ve zředěných kyselinách
- rozklad v koncentrované kyselině sírové
- hydrolyza v alkáliích
- rozpustnost ve fenolech
- obecně velmi dobré mechanické vlastnosti (záleží na přípravě)
- odolnost v oděru
- dobře odolný vůči slunečnímu záření
- nízká navlhavost
- nabíjení elektrostatickou elektřinou

V dnešní době se klasický polyester používá málokdy. Existuje velké množství modifikovaných polyesterových vláken se zlepšenými vlastnostmi. Vlákná se vyrábějí zvlákněním z taveniny [25].

Jiný oblíbený tvar polyesterových polotovarů a hotových výrobků je fólie. PES fólie se také většinou vyrábí se zákazníkem požadovanou povrchovou úpravou.

#### **Použité chemikálie**

- 95% kyselina sírová -  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Destilovaná voda

## **2.2 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ**

### **Rastrovací elektronový mikroskop**

Pro snímání obrazů byl použit Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) AQUASEM a systém pro akvizici a předzpracování obrazu TESCANA TS 1103, firmy TESCAN s.r.o.

### **CO<sub>2</sub> Laser**

Pro experiment byl použit infračervený pulzní CO<sub>2</sub> laser, model Marcatex 150 Flexi. Původně určený pro vypalování vzorů, lokální odbarvení, řezání textlie či výrobu reklamních předmětů.

Všechny ovládací a funkční prvky jsou integrovány do kompaktního systému, obr. 29. Systém se chladí pomocí externího chladicího zařízení.



Obr. 29 Laserový systém Marcatex 150 Flexi [26].

#### Technické charakteristiky:

- Model: Marcatex 150 Flexi
- Průměrný výkon: 150 W
- Špičkový výkon: 230 W
- Vstupní napětí: 220-240 V
- Spotřeba: Zapnutý laser: 2.3 KW, 8.7 A
- Pracovní kmitočet impulsů: 50-60 Hz  $\pm$  1%
- Energie impulsů: 5 – 230 mJ
- Čas aktivace/deaktivace impulsů: <45  $\mu$ s

#### Parametry paprsku:

- Rozbíhavost paprsku: <2.5 mrad (celý úhel)
- Průměr svazku (1/e): 7.5 $\pm$ 0.5 mm (pro normální korekci svazku)
- Stabilita směru paprsku: <200 mrad (poloviční úhel)
- Vlnová délka: 10,6  $\mu$ m
- Polarizace: lineární

## Software

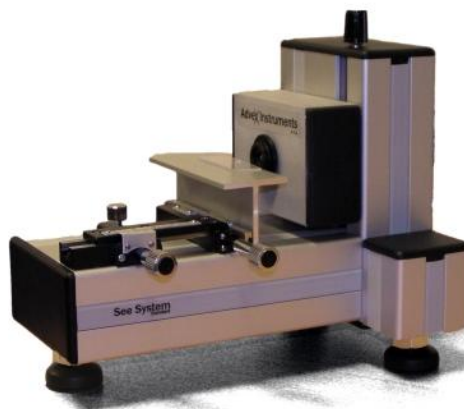
- Grafický editor s platformou Windows XP
- Navržený pro práci s grafickými a textovými soubory
- Kompatibilní s formáty DXF, BMP a JPG
- Rozlišuje 256 odstínů šedi

## Laboratorní podmínky

- Teplota okolí: +5...+40 °C
- Vlhkost: 10-80%

## Advex See System

Vyhodnocovací systém povrchové energie Advex See System společnosti Advex Instruments s.r.o. je přenosný a počítačem podporovaný přístroj, který je především určen pro měření kontaktního úhlu a povrchové energie měřených povrchů [27].



Obr. 20 Advex See System [27].

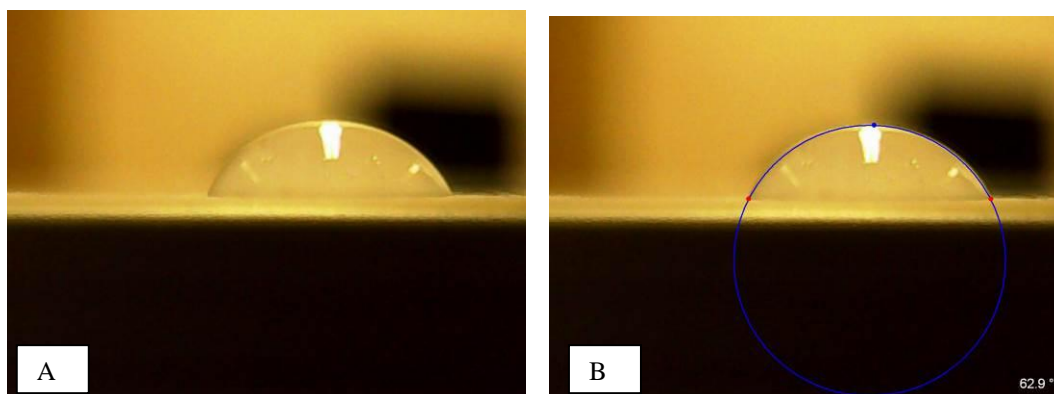
Systém se skládá s hliníkového krytu, barevné USB 2.0 videokamery s rozlišením 1.3 MPix. Videokamera je pohyblivá ve svislém směru, před ní se nachází ve vodorovném směru pohyblivý stolek pro vzorky. Nasnímané hodnoty lze zpracovat pomocí příslušného software.

Charakteristiky Advex See System:

- Operační systém: Windows XP nebo Windows 7 (32 bit verze)

- Snímky mohou být zachyceny v pravidelných časových intervalech, což je důležité pro modelování procesu smáčivosti povrchu
- Naměřené hodnoty lze velice rychle vyhodnotit pomocí software
- Vypočítání regresních modelů
- Komplexní analýza chyb

Ukázka snímku pomocí daného zařízení je na obr. 31.



Obr. 31 Snímek udělaný pomocí Advex See System (A); měření kontaktního úhlu (B).

## Rastrovací elektronový mikroskop PHENOM od FEI

Charakteristiky:

- Zvětšení: 80 - 15 000x
- Rozlišení: 25 nm
- Rozlišení 1 pixelu: 2,9 nm
- Ovládání: dotykový monitor, otočné tlačítko, počítačová myš
- Doba snímání: do 30 s
- Rozměry vzorku: do 25 x 30 mm
- Není nutné pokovování vzorků
- Příslušný software



Obr. 32 Rastrovací elektronový mikroskop PHENOM od FEI [28].

## **Makroskop NAVITAR**

Makroskop NAVITAR je umístěn na Kaiser RS1 Camera Copy Stand, obr. 33. System vyzařuje napodobeninu denního studeného světla pro profesionální pořízení obrázků a video záznamů. Makroskop je součástí obrazové analýzy podporované softwarem NIS-Elements.



Obr. 33 Makroskop NAVITAR se systémem nasvícení KAISER.

## **TalySurf CLI 500**

Laserový systém TalySurf CLI 500 od značky Taylor Hobson PRECISION je bezdotykový systém pro měření profilu povrchu.



Chatakteristiky:

- snímá plochu až 200 x 200 mm
- rozlišení až 1  $\mu\text{m}$
- příslušný software
- vytvoření virtuálních 2D a 3D povrchů
- rozměrová analýza



Obr. 34 Laserový systém Talysurf CLI 500 [29].

## Optický 3D mikroskop ContourGT-K

Optické mikroskopy Contour GT společnosti Bruker nabízí možnost bezdotykového měření profilů různých povrchů, obr.35. Snímání povrchu se provádí pomocí patentovaného dvojzdrojového osvětlovacího systému. Nasnímaná data jsou vyhodnocena pomocí příslušného software. Systém poskytuje možnost 3D zobrazení profilů.

Charakteristiky:

- zvětšení 1 – 115 x
- rozlišení 0,1 nm – 10 mm
- rozměry vzorku: 150 x 150 mm
- rychlost snímání 28,1  $\mu\text{m/s}$



Obr. 35 Optický 3D mikroskop ContourGT-K [30].

## Siloměr

Pro stanovení pasivní odporové síly byl použit senzorový dvourozsahový siloměr pro měření síly v tlaku i v tahu značky Vernier, obr. 36. Siloměr lze připojit k počítači a pomocí software Logger-Lite vyhodnotit naměřená data.



Obr. 36 Siloměr značky Vernier [31].

### Rozsahy a citlivost:

- Rozsah -10 N až 10 N: citlivost 0,01 N
- Rozsah -50 N až 50 N: citlivost 0,05 N [31]

## Přenosný datalogger LabQuest 2

Výše popsaný siloměr lze připojit k přenosnému dataloggeru LabQuest 2, též značky Vernier, obr. 37 .



Obr. 37 Přenosný datalogger LabQuest 2 [32].

#### Charakteristiky:

- barevný dotykový displej  $11,2 \times 6,7$  cm (úhlopříčka 13,1 cm), 800 x 480 zobrazovaných bodů
- WiFi pro propojení s tablety, mobilními telefony, notebooky, možnost odesílat naměřená data e-mailem
- Bluetooth pro připojení bezdrátových senzorů
- hmotnost 350 g, rozměry  $8,8 \text{ cm} \times 15,4 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$
- 800 MHz procesor [32]

### Statistické softwary

**MiniTab** – software pro statistické zpracování a analýzu dat. Na rozdíl od jiných podobných software, je velice jednoduchý v použití, nabízí přehledné vyhodnocení dat s možností grafického znázornění vypracovaných výsledků.

**MatLab** – programovací software pro zpracování, analýzu a vyhodnocení dat. Nabízí mnoho možností, mezi které patří obrazová analýza, použitá v této práci.

## 2.3 Příprava vzorků pomocí laseru

Cílem úpravy povrchu fólií pomocí laseru je vytvořit drážkovaný povrch s různou hloubkou drážek.

### 2.3.1 Bezpečnost práce s laserovým zařízením

Vlnová délka laserového paprsku  $\text{CO}_2$  laseru se pohybuje v mezích 9,3-11,5  $\mu\text{m}$ , tudíž patří k infračervenému spektru. Infračervené záření je neviditelné pro lidské oko.

Zaostřený laserový paprsek je dost výkonný pro řezání materiálů, avšak je potenciálně nebezpečný, i když zaostřený není. Laserový svazek je pohlcován většinou dielektrických materiálů, jako voda, rostliny, jiné biologické tkáně a je ihned pohlcen prvním materiálem, se kterým přijde do styku. Záření  $\text{CO}_2$  laseru se odráží od hladkých kovových povrchů.

Laserový paprsek, který se dostane do lidského oka, může vyvolat zranění s trvalými následky. Při kontaktu s lidskou pokožkou dochází ke vzniku spálenin a řezných ran.

Kvůli výše popsaným nebezpečím se musí při práci s laserem používat speciální ochranné brýle. Je zakázáno dívat se na laserový paprsek při jeho emisi. Také je zakázáno rovnat a přidávat vzorky nebo materiál při působení laseru na ně.

### 2.3.2 Nastavené parametry při ozařování

Pracovní cyklus, [%]	50
Frekvence, [kHz]	5
Doba pulsu, [ $\mu\text{s}$ ]	[160;210]

### 2.3.3 Orientační pokus

V grafickém editoru ovládacího softwaru byl nakreslen obdélník o rozměrech 1 x 5 cm. Do vypalovacího pole laseru, s předběžně nasvíceným místem ozařování, byl zvolen obdélníkový vzorek PES fólie o rozměrech 15 x 20 cm. Doba pulsu byla nastavena na 50  $\mu\text{s}$ .

Následně byl vzorek označen laserovým paprskem. Po vyjmutí vzorku se žádné viditelné změny nevyskytly. Pokus se opakoval pro dobu pulsu 100  $\mu$ s a 200  $\mu$ s. Pro 100  $\mu$ s také nenastala žádná viditelná změna. Pro 200  $\mu$ s byl obdélník výrazně viditelný s poměrně drsným, drážkovaným povrchem. Reálné vzorky jsou přiloženy v Příloze \_\_\_\_.

Následně bylo experimentálně stanoveno, že pro danou PES fólii je dolní hranice doby pulsu pro viditelnou změnu povrchu 150  $\mu$ s. Při ozařování s nastavením 150  $\mu$ s je ale fólie s minimálními změnami. Naopak, při nastavení 220  $\mu$ s, se ve fólii propálila díra.

**Výsledek:** Doporučujeme nastavit dobu pulsu na hodnotu v intervalu [160;210].

### 2.3.4 Příprava vzorků

Ve výše popsané zkoušce byla ozářená plocha 1 x 5 cm. To je ale nedostatečný rozměr pro následné zkoušky.

Další pokus byl proveden s nastavením doby pulsu 160  $\mu$ s a ozařovanou plochou vzorku 10 x 10 cm. Při vystavení laserovému záření se začala fólie během ozařování kroutit. Po vyjmutí již neměla stejnoměrnou strukturu. Z tohoto důvodu byla pro další přípravu vzorků vyrobena kartonová podložka. Fólie se na ní upevnila pomocí sponek. Ozářování se opakovalo. Ve výsledku měl stále vzorek tendenci se kroutit.

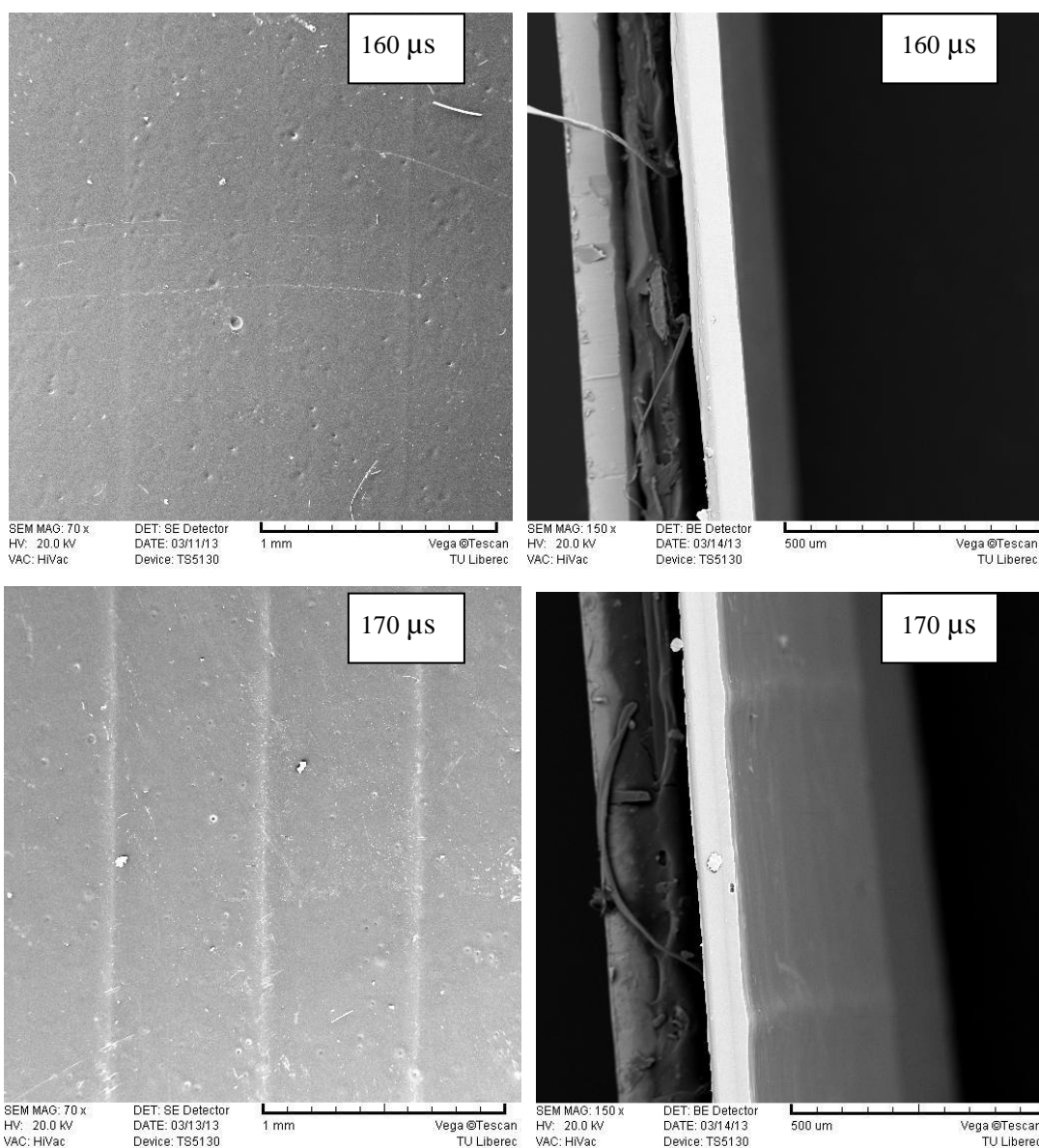
Dalším krokem pro zdokonalení přípravy vzorku bylo navrhnout chlazení pro laseru vystavené vzorky. Pro tento účel byla použita 1mm tlustá netkaná textilie, vyrobená metodou naplavování vláken a následně lisovaná.

Netkaná textilie se namočila ve studené vodě a umístila se na kartonovou podložku. Na ní se sponkami upevnila nová fólie. Ozářování s nastavenou hodnotou 160  $\mu$ s se opakovalo. Vyrobený vzorek byl stejnoměrně drsný, ale tendence se kroutit mu zůstala. Netkaná textilie pod vzorkem byla na omak dost teplá, svůj účel chlazení ale splnila.

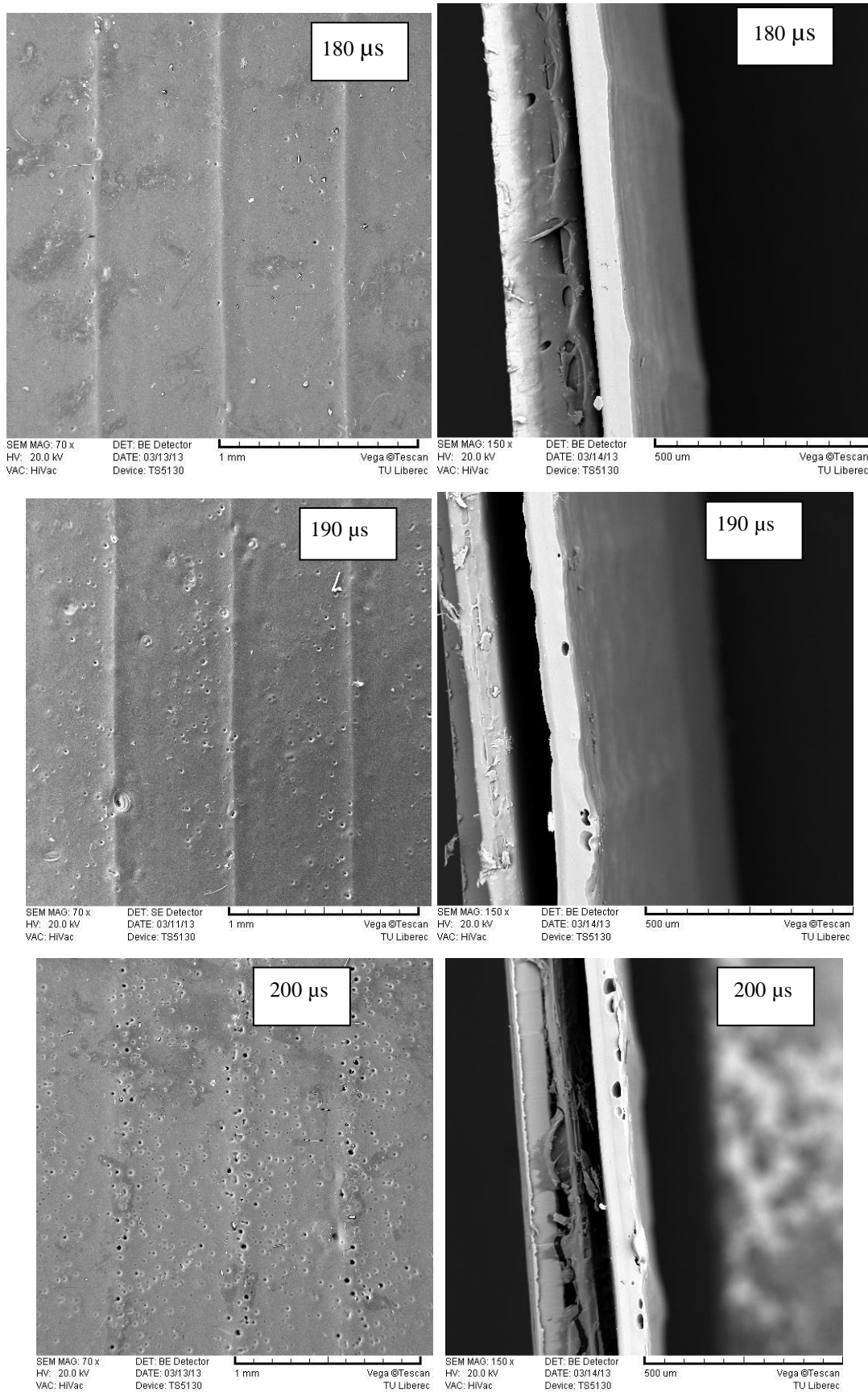
Při následných zkouškách se zvýšením hodnoty doby pulsu zjistilo, že ozařovaná plocha 10 x 10 cm je příliš velká, a že netkaná textilie nemůže pohlcovat dostatečné množství tepla. Důsledkem toho byly vzorky s bublinami a nestejnoměrné. Kupříkladu, při době pulsu 180  $\mu$ s, po zpracování fólii laserem byla netkaná textilie téměř suchá.

Protože se pokusy prováděly v zimě, k vodě, ve které se namáčela netkaná textilie jsme přidali sníh, což výrazně zlepšilo kvalitu vzorku s dobou pulsu 190 a 200  $\mu$ s. Ozařovací plocha všech vzorků byla ale zmenšena z 10 x 10 cm na 4,5 x 7,5 cm. Příprava vzorků s dobou pulsu 200  $\mu$ s byla zamítnuta z důvodu nestejnoměrnosti povrchů hotových vzorků i při zmenšení plochy ozáření.

Snímky vzorků připravených pomocí laseru byly vytvořeny pomocí Rastrovacího elektronového mikroskopu. Na obrazech jsou znázorněny horní pohled a řez vzorků.



Obr. 38 Vzorky s laserovou úpravou povrchu. Vlevo – horní pohled, vpravo – příčný řez.



Obr. 38a Vzorky s laserovou úpravou povrchu. Vlevo – horní pohled, vpravo – příčný řez.



Jak je vidět z obrázků, se zvýšením doby pulsu (doby působení laseru na vzorek), drážky jsou výraznější a hlubší. Také se ve struktuře fólií začaly vytvářet bubliny. Detailní rozbor struktury povrchu je popsán v kapitole 2.7 Stanovení parametrů drsnosti.

## **2.4 Příprava vzorků pomocí $H_2SO_4$**

Jak bylo uvedeno v teoretické části, pod vlivem koncentrované kyseliny sírové se polyester rozkládá. Podle diplomové práce inženýrky Jany Mertlíkové [24], lze působením koncentrované kyseliny sírové na polyesterovou fólii získat povrch s členitým profilem.

V této práci je cílem zkoumat rozdíl profilů povrchů při použití různých koncentrací kyseliny a různé doby kontaktu s fólií.

### **2.4.1 Bezpečnost práce s koncentrovanými kyselinami**

- Před zahájením práce je povinné seznámit se s bezpečností práce.
- Při práci v chemické laboratoři je nutno dodržovat laboratorní řád.
- Při práci s koncentrovanými kyselinami je povinné mít chemický plášť, laboratorní rukavice a ochranné brýle.
- Ředění kyselin se provádí v digestoři. Kyselina se nalévá do vody s průběžným mícháním skleněnou tyčinkou.
- Kyselina se přelévá z jedné nádoby do jiné pomalu a velice opatrně.
- Při styku kyseliny s pokožkou, je nutno zasažené místo ihned opláchnout velkým množstvím studené vody. Pro následné ošetření je lepší obrátit se na laboratorní personál.

### **2.4.2 Orientační pokus**

Cílem orientačního pokusu bylo zjistit při jakých koncentracích kyselina sírová začíná působit na PES fólii. Podle [24] se změna povrchu projevila při 70% koncentraci a kontaktní době 10 minut.

Z 95% koncentrované kyseliny byly připraveny následující koncentrace  $\text{H}_2\text{SO}_4$  : 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%. Hmotnost připravených roztoků – 50 g.

První pokus se provedl s 95% kyselinou sírovou, kontaktní doba 10 s. Vzorek se po vyjmutí z kyseliny vizuálně nezměnil. Oplachování se provádělo ve velké skleněné kádince s destilovanou vodou.

Ihned po kontaktu s vodou původně průhledná fólie zbělala a stala se neprůhlednou, obr. 39. Pro odstranění zbytku kyseliny se vzorek louhoval v destilované vodě po dobu 1 h s periodickým mícháním.



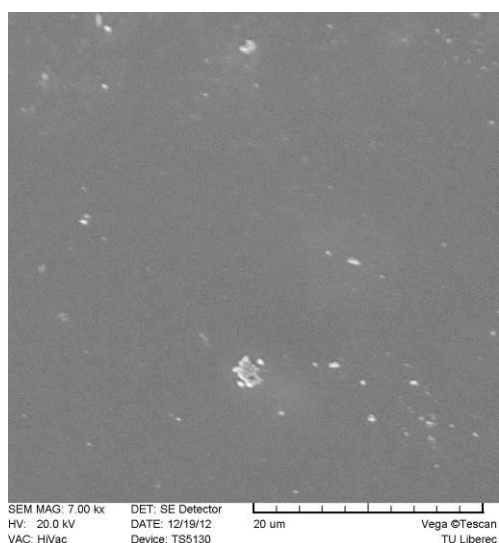
Obr. 39 Změna vzhledu PES fólie po zpracování v 95%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  po dobu 10 s.

Podle stejného postupu se provedly zkoušky s ostatními koncentracemi. Efekt zbělání nastal pouze u 90%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

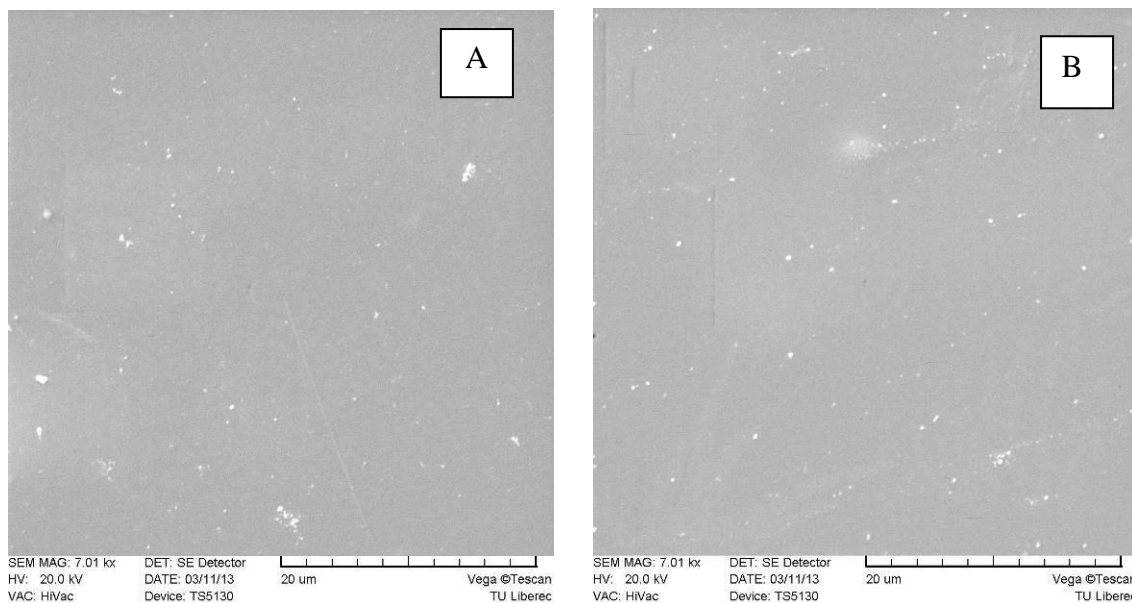
Pro koncentrace 85%, 80%, 75%, 70% a 65% se doba působení zvýšila zpočátku na 1 minutu. Po oplachování žádná viditelná změna nenastala. Pro další pokus se doba působení zvýšila na 10 min. Podle [24] právě po 10 minutách nastala změna povrchu v 70% roztoku kyseliny: vznikl popraskaný povrch.

Ani po 10 min. nenastala žádná viditelná změna. Pro 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se pokus provedl s kontaktní dobou 30 min. Pro vyhodnocení povrchů na mikroskopické úrovni

byly pořízeny snímky pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Jak je zřejmé z obrázků, žádná změna v kvalitě povrchu nenastala.

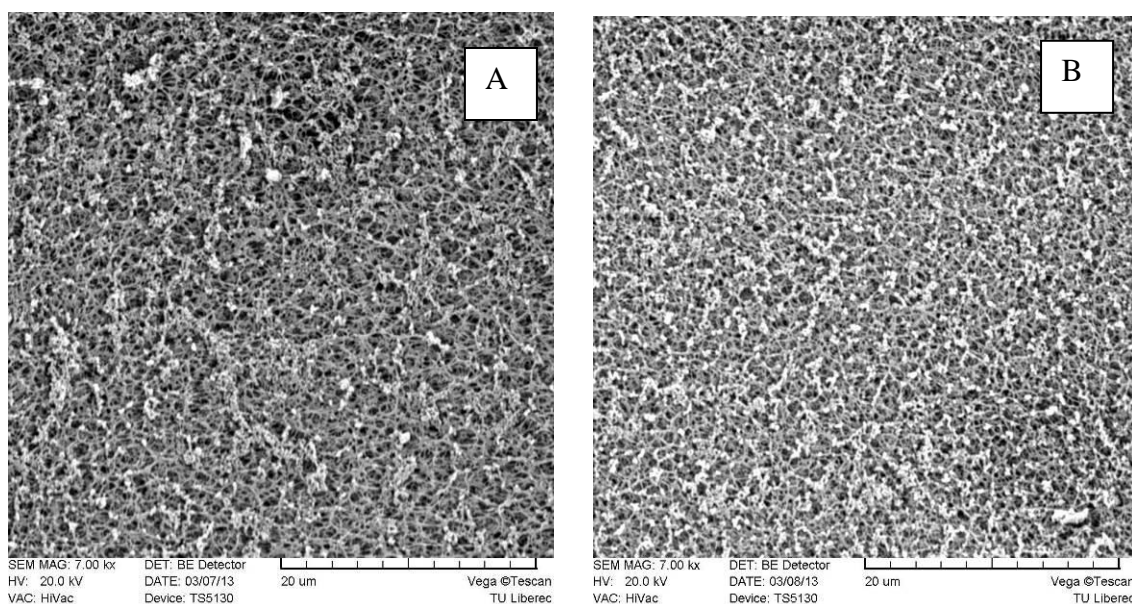


Obr. 40 Původní fólie.



Obr. 41 Fólie zpracována v 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  po dobu 10 min. (A) a po 30 min.(B).

Naopak pokusy s 90% a 95% koncentrovanou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  byly velice úspěšné, obr. 42. Vzhledem k docela podobné struktuře povrchů, bylo pro další výrobu vzorků rozhodnuto používat pouze 95% kyselinu sírovou. Pro pokročilejší rozbor problematiky zpracování PES fólií kyselinou sírovou by bylo vhodné detailně zkoumat rozdíl profilů povrchů při různých koncentracích kyseliny. Pro tuto studii tento rozbor není podstatný.



Obr. 42 Fólie zpracovaná po dobu 10 s v 90% (A) a 95% (B)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Měřítka: 20  $\mu\text{m}$ .

Následně byly připraveny malé vzorky v 95% kyselině sírové s odlišnou dobou působení chemikálii: 5 s, 10 s, 15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 35 s, 40 s, 45 s.

Detailní rozbor struktury povrchu je popsán v podkapitole 2.7 Stanovení parametrů drsnosti.

## 2.5 Úprava povrchu fólií pomocí nanášení prášků

### 2.5.1 Stanovení teploty tání prášků

Experimentálně byla stanovena přibližná teplota tání Prášku 1, Prášku 2 a teplota tání bikomponentních vláken. Pod teplotou tání bikomponentních vláken se myslí teplota, při které se vlákna začínají pojít mezi sebou.

Pro stanovení teploty tání se malé množství každého prášku nasypalo na malý připravený vzorek PES fólie, který byl před tím umístěn na papírovou podložku do skleněné Petriho misky. Potom se tři připravené misky umístily do laboratorní sušárny, předehřáté na 110 °C na dobu 5 min. Po pěti minutách se vzorky vyndaly a byly zkontrolovány na změnu stavu.

Následně se teplota sušárny postupně zvyšovala o 3 °C. Pokaždé se vzorky nechávaly ohřát po dobu 5 min. V okamžiku, kdy určitý vzorek prášku začal měknout, teplota sušárny se zvyšovala o 1 °C.

**Výsledky:** Tímto postupem byly experimentálně stanoveny následující hodnoty:

- Teplota tání Prášku 1 - 135 °C;
- Teplota tání Prášku 2 – 130 °C;
- Teplota tání bikomponentních vláken – 150 °C.

### 2.5.2 Příprava vzorků

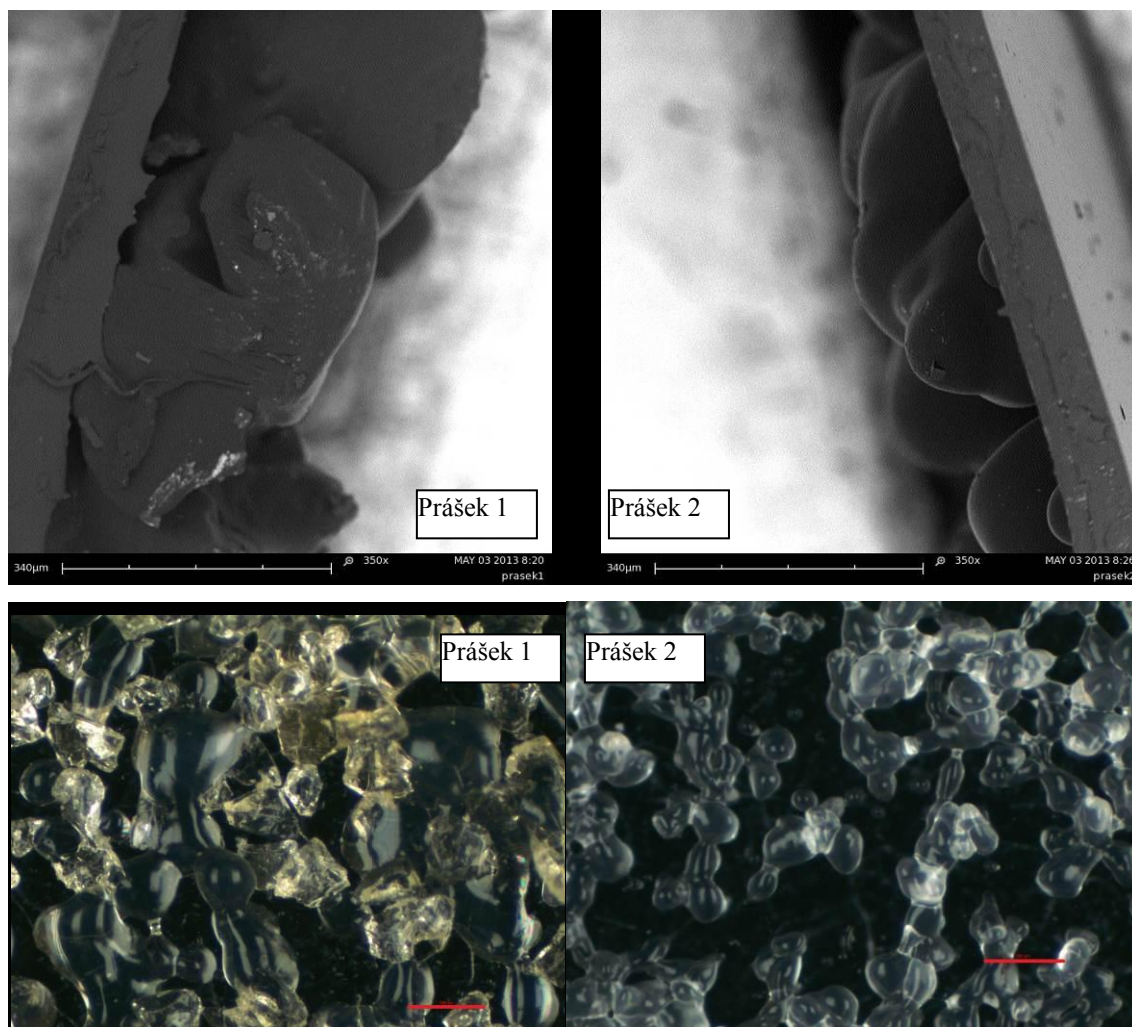
Za orientační pokus lze považovat pokus pro stanovení teplot tání prášků. Po ochlazení vzorků prášek se na fóliích držel.

Rozměry vzorků: 12,5 x 12,5 cm. Vzorky byly umístěny na papírovou podložku do Petriho misky. 3,8 g Prášku 1 (experimentálně zjištěná hodnota pro úplné pokrytí fólie) se nasypalo na fólii a bylo rovnoměrně rozprostřeno po celé ploše pryžovým válcem. Poté se Petriho miska umístila na 5 min. do předehřáté sušárny na teplotu tání Prášku 1.

Po vyjmutí ze sušárny se vzorek umístil na 30 min pod závaží o hmotnosti 1 kg, za účelem zamezit zkroucení fólie. Po 30 minutách byl vzorek zkontrolován. Prášek se roztavil stejnoměrně. Částice prášku pevně držely jak mezi sebou tak i na PES fólii.

Experiment se opakoval pro Prášek 2 s předehřátím sušárny na teplotu tání Prášku 2. Pro každý druh prášku bylo připraveno 5 vzorků.

Snímky řezů vzorků s nanesenými prášky byly nasnímány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu PHENOM. Ostatní snímky pomocí makroskopu Navitar.



Obr. 43 Příčný řez a horní pohled vzorků s nataveným práškem. Měřítka: příčný řez: 340  $\mu\text{m}$ , horní pohled: 500  $\mu\text{m}$ .

Detailní rozbor struktury povrchu je popsán v podkapitole 2.7 Stanovení parametrů drsnosti.

## 2.6 Měření smáčivostí povrchů vzorků

Povrch všech připravených vzorků byl otestován na smáčivost. Měření kontaktního úhlu se provádělo kapkovou metodou pomocí zařízení Advex See System. Statistické zpracování a analýza dat se prováděla pomocí programu MiniTab.

Počet měření pro každý druh úpravy: 15.

Všechna testování hypotéz a konstrukce intervalu spolehlivosti se provedla na hladině významnosti 0,05.

### 2.6.1 ANOVA

ANOVA, neboli Analysis of Variance, je statistická metoda, pomocí které lze provádět vícenásobné srovnání středních hodnot z několika výběrů a ověřit zda na hodnotu náhodné veličiny má vliv nějaký faktor. Metoda je založena na srovnání rozptylů výběrových souborů [33].

Předpoklady pro použití metody ANOVA:

- nezávislost měření
- homogenita naměřených dat
- data pochází z normálního rozdělení a z populací se shodným rozptylem

**Jednofaktorová analýza rozptylu**, také analýza *rozptylu jednoduchého třídění*, *one-way ANOVA*, zkoumá vliv pouze jednoho faktoru na náhodnou veličinu. Testovací kritérium F lze obecně vysvětlit:

$$F = \frac{\text{rozptyl "mezi skupinami"}}{\text{rozptyl "uvnitř skupin"}} \quad (6)$$

Testuje se nulová hypotéza  $H_0$ , že střední hodnoty skupin jsou stejné. Při zamítnutí nulové hypotézy platí alternativní hypotéza  $H_1$ , že ne všechny střední hodnoty jsou stejné. Nulová hypotéza se zamítá, když hodnota testovacího kritéria F překročí kritickou hodnotu  $F_{\text{krit}}$  Fisherova rozdělení (hodnoty lze najít ve statistických tabulkách) [33].

*p-hodnota* ukazuje, na jaké hladině významnosti lze zamítnout nulovou hypotézu. Porovnává se s hladinou významnosti testu. Například testujeme-li na hladině 0,05 a *p-hodnota* překročí 0,05, lze nulovou hypotézu zamítnout. Nepřekročí-li, nulovou hypotézu nelze zamítnout s 95% pravděpodobností [33].

Pro testování vlivu jednoho faktoru pouze na 2 skupiny (výběry) lze použít dvouvýběrový T-test, s testovacím kritériem T [33].

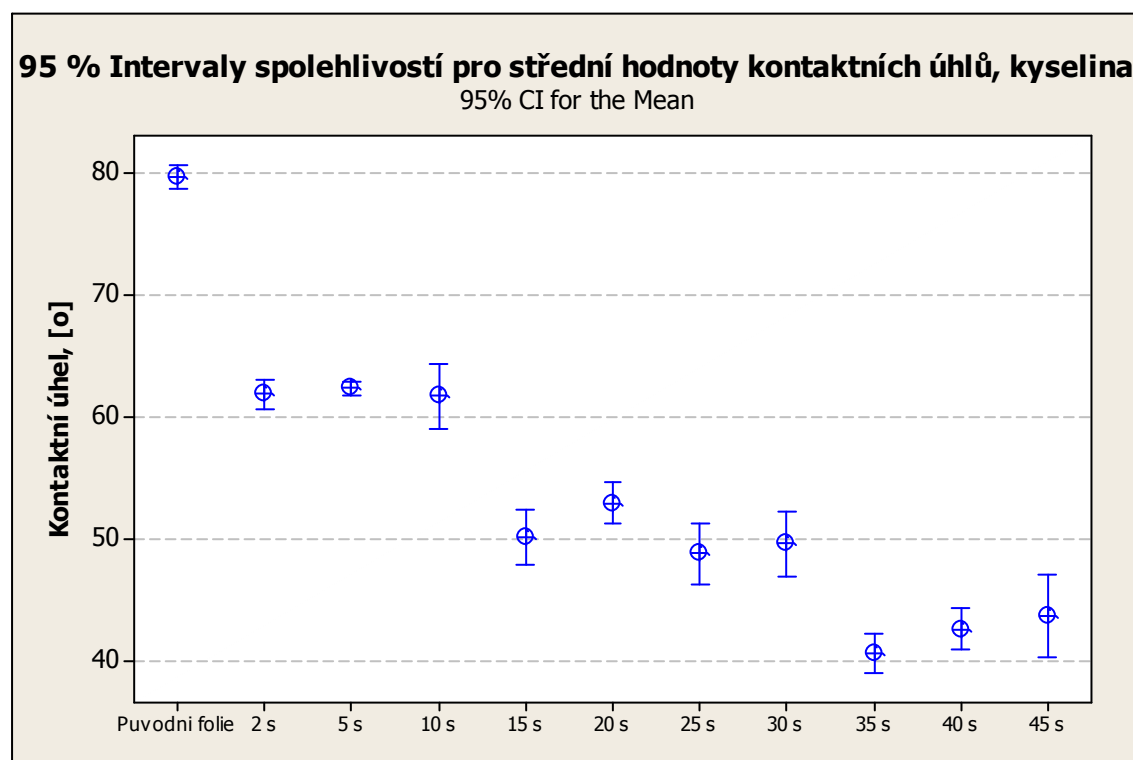
## 2.6.2 Vzorky upravené kyselinou sírovou

V tabulce 1 jsou uvedeny průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Tab. 1 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

	Původní fólie	2 s	5 s	10 s	15 s	20 s	25 s	30 s	35 s	40 s	45 s
Průměr [°]	79,6	61,9	62,3	61,7	50,1	53,0	48,8	49,6	40,7	42,6	43,8
Směr. Odch. [°]	1,6	2,1	0,9	4,7	3,9	2,9	4,3	4,7	2,7	3,0	5,9
Var. Koef. [%]	2,0	3,4	1,5	7,6	7,8	5,5	8,9	9,5	6,7	7,0	13,5

Naměřená data byla otestována na normalitu pomocí Q-Q grafu v programu MiniTab a pochází z Normálního rozdělení.



Obr. 44 95 % Intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, kyselina.



Následně v MiniTabu bylo provedeno porovnání průměrů pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu (One-Way ANOVA) s následným párovým srovnáním mezi kategoriemi (ANOVA s kontrastem).

Jednofaktorová ANOVA pro vzorky připravené pomocí  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :

$$F = 139,69 \quad p = 0,000$$

Nulová hypotéza, že střední hodnoty kontaktních úhlů mezi skupinami jsou stejné, se zamítá, protože  $p < 0,05$ .

### Výsledky:

- s 95% pravděpodobností nelze tvrdit, že hodnota kontaktních úhlu je pro všechny kategorie stejná.
- Srovnání mezi kategoriemi vyčlenilo 4 statisticky odlišné skupiny (rozdíl středních hodnot mezi těmi skupinami je statistický nevýznamný):

1. Původní fólie
2. 2 s, 5 s, 10 s
3. 15 s, 20 s, 25 s, 30 s
4. 35 s, 40 s, 45 s

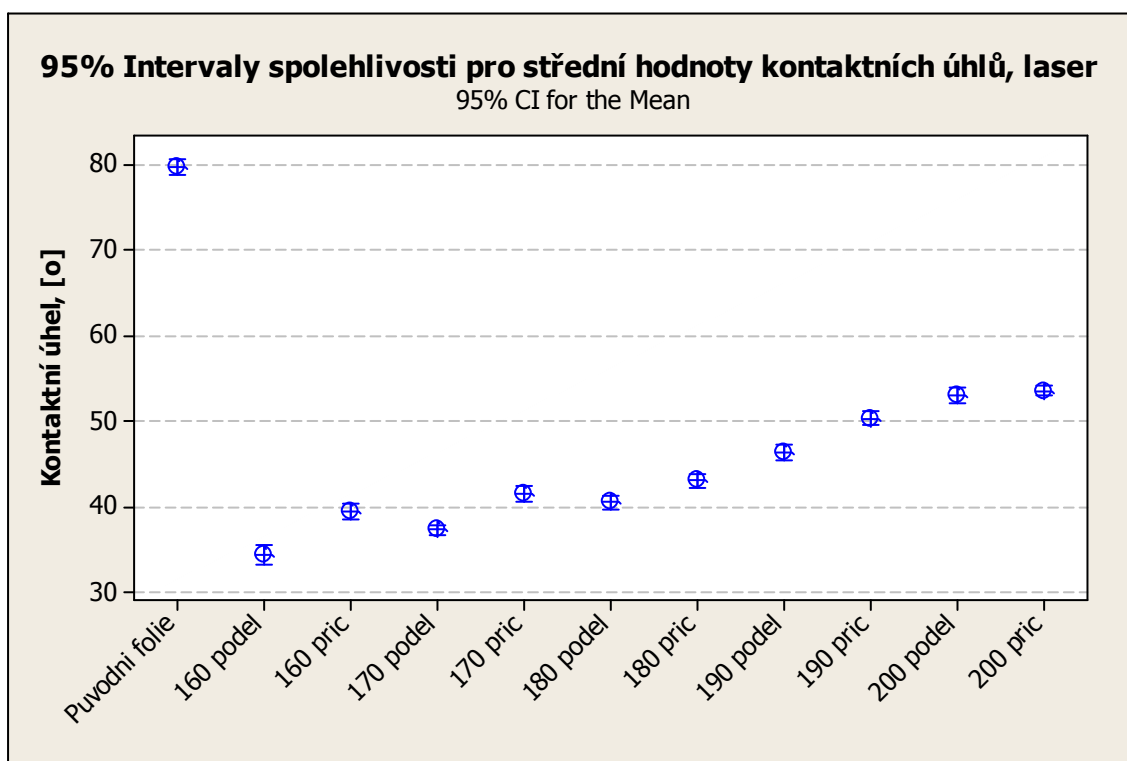
Pro následné měření odporové síly se připravily vzorky o velikosti 10 x 12 cm. Kontaktní doba s kyselinou sírovou: 5 s, 20 s, 40 s.

### 2.6.3 Vzorky upravené pomocí laseru

V tabulce 2 jsou uvedeny průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí laseru s různou pulsní dobou. Kontaktní úhel se pozoroval jak podél drážek, tak i napříč.

Tab. 2 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky připravené pomocí laseru.

	160 $\mu\text{s}$ podél	160 $\mu\text{s}$ příč	170 $\mu\text{s}$ podél	170 $\mu\text{s}$ příč	180 $\mu\text{s}$ podél	180 $\mu\text{s}$ příč	190 $\mu\text{s}$ podél	190 $\mu\text{s}$ příč	200 $\mu\text{s}$ podél	200 $\mu\text{s}$ příč
Průměr [°]	34,3	39,4	37,2	41,4	40,5	43,0	46,4	50,3	53,1	53,6
Směr. Odch. [°]	2,2	1,5	1,2	1,6	1,3	1,5	1,6	1,5	1,7	1,1
Var. koef [%]	6,3	3,9	3,2	3,9	3,2	3,6	3,4	2,9	3,2	2,1



Obr. 45 95 % Intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, laser.

Naměřená data byla otestována na normalitu pomocí Q-Q grafu a pochází z Normálního rozdělení.

Zprv je vhodné porovnat odlišnost smáčivosti pro podélné a příčné řezy vzorků pro skupiny se stejnou dobou ozáření laserem (dobou pulsu). Pro porovnání se použil dvouvýběrový T-test. Pro srovnání mezi skupinami se použila jednofaktorová ANOVA s kontrastem.

### Dvouvýběrový T-test:

Tab. 3 Výsledky T-testu

	160 $\mu$ s	170 $\mu$ s	180 $\mu$ s	190 $\mu$ s	200 $\mu$ s
T hodnota	7,11	7,75	4,75	6,84	0,96
p hodnota	0,000	0,000	0,000	0,00	0,346

Jednofaktorová ANOVA pro vzorky připravené pomocí laseru:

$$F = 261,57 \quad p = 0,000$$

### Výsledky:

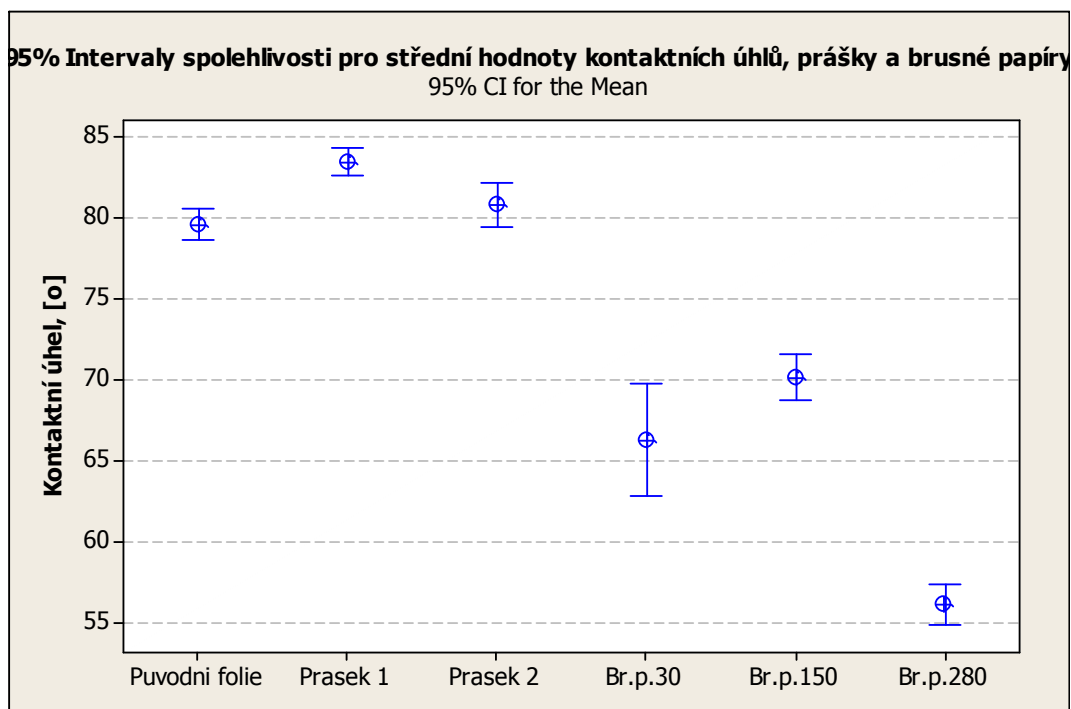
- s 95% pravděpodobností nelze tvrdit, že vzorky s různou dobou pulsu jsou stejné.
- Rozdíl mezi středními hodnotami pro dobu pulsu 200  $\mu$ s není statisticky významný.
- Náhlé zmenšení kontaktního úhlu po úpravě povrchu laserem. Je to možné jako důsledek odpaření povrchové úpravy původní fólie.
- Lze prozkoumat možnost ozářování povrchů materiálů laserem pro změnu smáčivosti.

### 2.6.4 Vzorky s nataveným práškem a brusné papíry

V tabulce 4 jsou uvedeny průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty kontaktního úhlu pro vzorky připravené pomocí natavení prášků a brusných papírů.

Tab. 4 Hodnoty kontaktních úhlů pro vzorky s prášky a brusné papíry.

	Prášek 1	Prášek 2	Br.p.30	Br.p.150	Br.p.280
Průměr [°]	83,5	80,8	66,3	70,2	56,1
Směr. Odch. [°]	1,4	2,4	6,1	2,5	2,1
Var. koef [%]	1,7	3,0	9,2	3,5	3,8



Obr. 46 95 % Intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů, prášky a brusné papíry.

Naměřená data byla otestována na normalitu pomocí Q-Q grafu a pochází z Normálního rozdělení.

Pro srovnání průměru se použila jednofaktorová ANOVA s kontrastem:

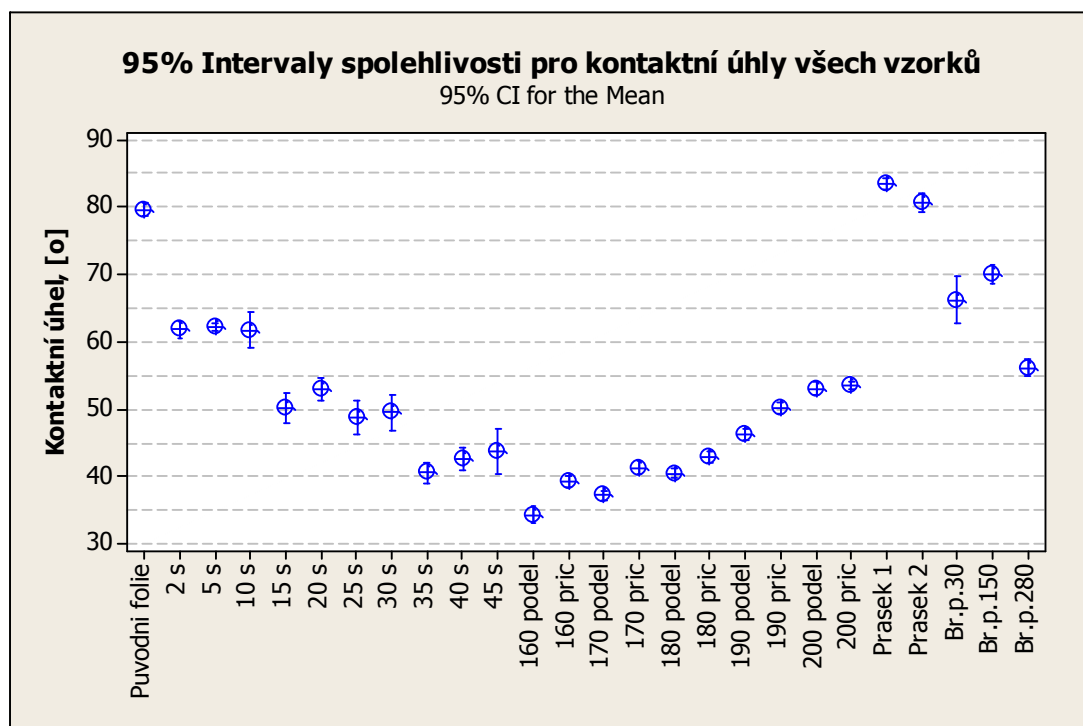
$$F = 158,02 \quad p = 0,000$$

### Výsledky:

- s 95% pravděpodobnosti nelze tvrdit, že kontaktní úhel vzorků je stejný.
- Analýza s kontrastem prokázala, že vzorky mají odlišnou smáčivost.
- Relativně velkou směrodatnou odchylku pro kontaktní úhel u brusného papíru 30 lze vysvětlit vysokou variabilitou rozměru částic na povrchu papíru.

### 2.6.5 Kompletní porovnání kontaktních úhlů

Srovnání úhlů smáčivosti všech vzorků je znázorněno na obr. 47. Jak je vidět, hodnoty kontaktních úhlů jsou pro Prášek 1 a Prášek 2 vyšší než u původní fólie. Všechny ostatní úpravy výrazně zlepšily smáčivost materiálu.



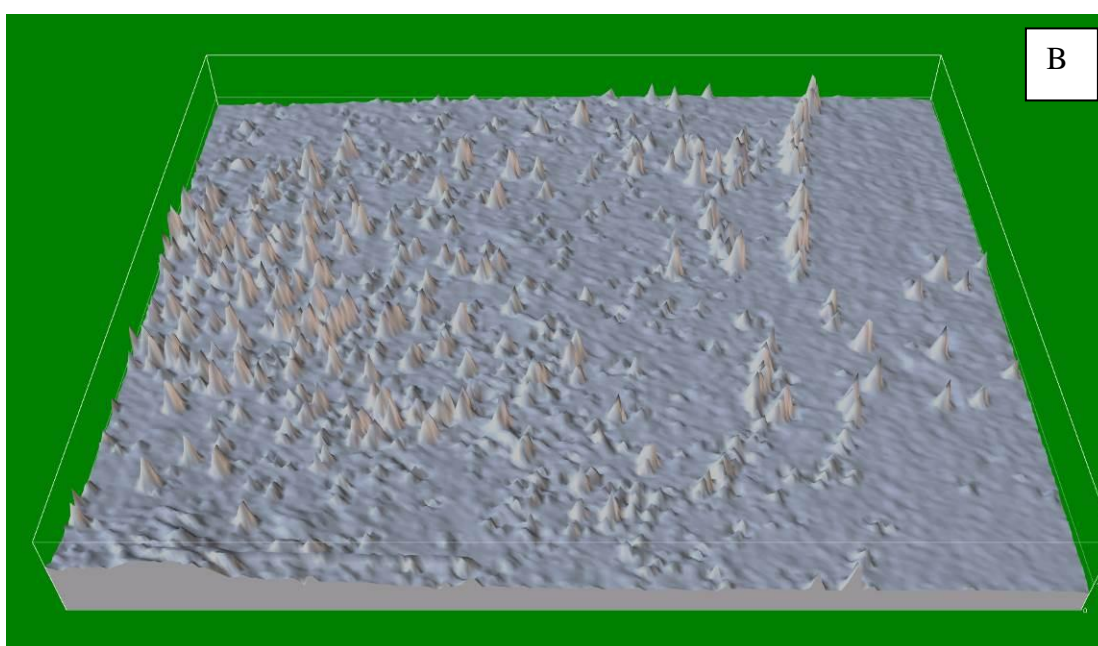
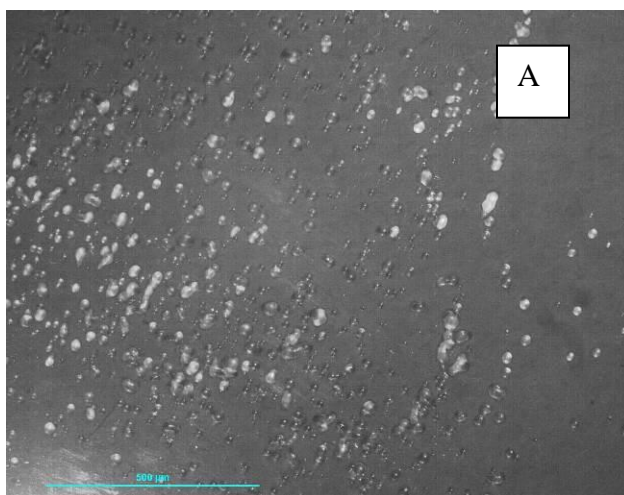
Obr. 47 95 % Intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty kontaktních úhlů všech vzorků.

## 2.7 Stanovení parametrů drsnosti

Drsnost povrchů byla vyhodnocena pomocí obrazové analýzy. Pro provedení této analýzy bylo nezbytné pořízení snímků povrchu vzorků. Snahou bylo také pořízení 3D profilů pro vytvoření lepší představy o struktuře povrchů.

Původním záměrem bylo nasnímat 3D profily pomocí zařízení Talysurf CLI 500. Jelikož je to bezkontaktní metoda, pro snímání se používá laser. Z důvodu průhlednosti fólie, prášku a velice lesklého a odrazivého povrchu brusných papíru, použití této metody snímání nebylo úspěšné. Pro pořízení obrazu vzorků upravených kyselinou přístroj neměl dostatečné rozlišení.

Software NIS-Elements také umožňuje vytváření 3D struktur povrchů. Pro získání digitalního profilu stačí importovat několik snímků s různými úhly záběru a software pomocí stupnice šedi vyhodnotí strukturu profilu. Z toho plyne, že tato metoda nefunguje pro průhledné a odrazné materiály. Příklad 3D povrchu vytvořeného z obrázku roztaveného prášku je na obr. 48. Jak je vidět z obrázku, kapky polymeru nejsou stejnoměrně nasvícené a software vyhodnotil profil jako špičatý, i když ve skutečnosti jsou kapky kulaté.

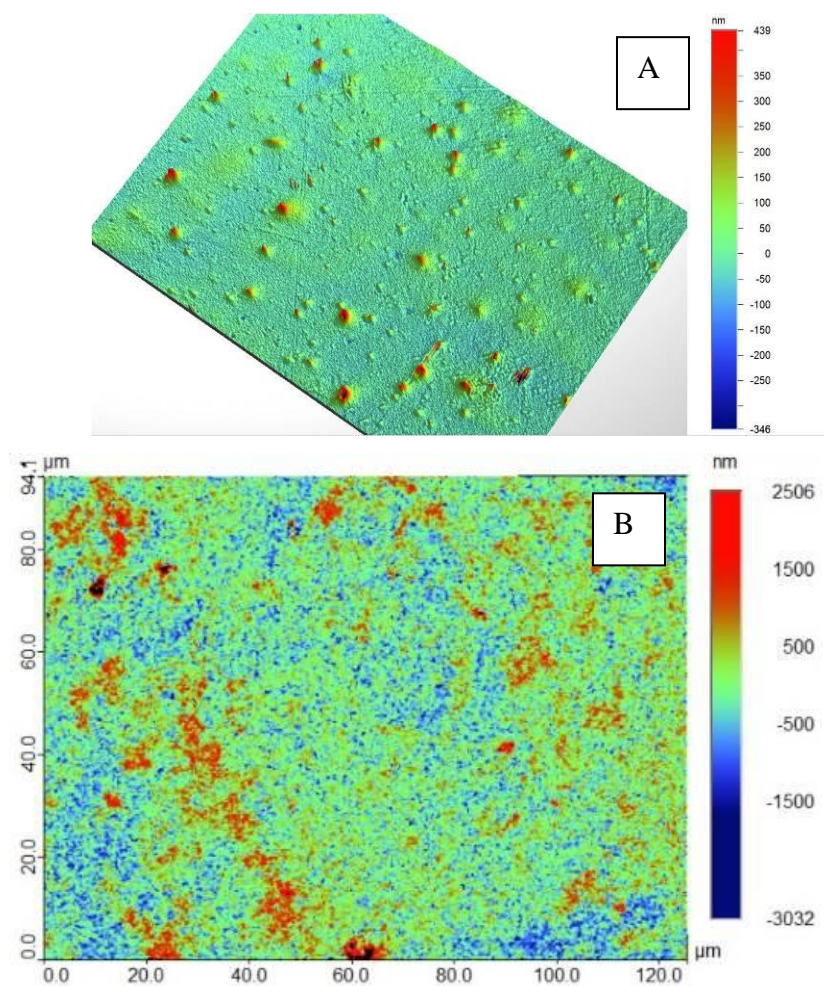


Obr. 48 Snímek fólie s malým množstvím nataveného prášku z makroskopu (A), měřítko: 500  $\mu\text{m}$ ; vytvořeno pomocí NIS-Elements 3D (B).

Nakonec se 2D, 3D snímky a parametry drsnosti získaly pomocí optického mikroskopu Contour GT-K z Vysokého Učení Technického v Brně. Avšak i pomocí tohoto speciálního mikroskopu nebylo možné vytvořit snímky všech struktur.

### 2.7.1 Původní fólie

Snímky fólie jsou znázorněny na obr. 49.



Obr. 49 3D snímek (A) a 2D mapa profilu (B) původní fólie. Snímky pořízeny pomocí Contour GT-K.

Hodnoty parametrů drsnosti:

$R_a$  : 0,02  $\mu\text{m}$ ,  $R_q$  : 0,03  $\mu\text{m}$ , kde

$R_a$  - střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu

$R_q$  - střední kvadratická hodnota drsnosti povrchu

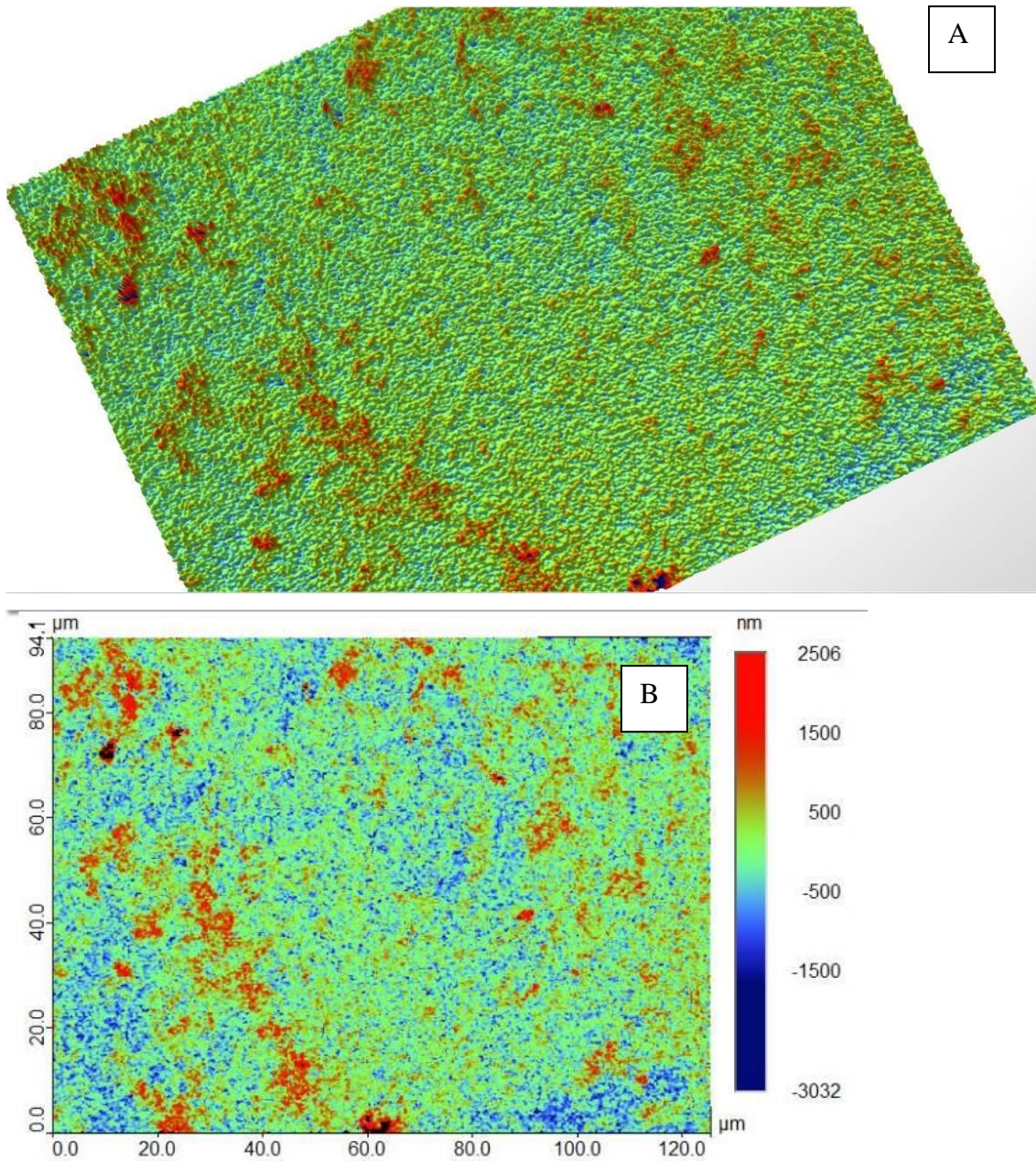
### 2.7.2 Vzorky upravené pomocí kyseliny

Vzhledem k velké členitosti povrchu a propojení “výstupků” se prostřednictvím obrazové analýzy v MatLabu nepodařilo zjistit počet zrn na 1  $\text{cm}^2$ . Velikost zrn je pro kontaktní dobu 5 s, 20 s a 40 s přibližně stejná: 1 - 5  $\mu\text{m}$ .



Hodnoty parametrů drsnosti:

$R_a : 0,42 \mu\text{m}$ ,  $R_q : 0,54 \mu\text{m}$ .



Obr. 50 Ukázka 3D profilu (A) a plošné mapy profilu povrchu fólie zpracované po dobu 20 s v kyselině (B). Snímky pořízeny pomocí Contour GT-K.



### 2.7.3 Vzorky upravené natavováním prášků a brusné papíry

Metoda stanovení 3D profilu pomocí optického mikroskopu Contour GT-K se neprokázala jako vhodná pro vzorky upravené natavováním prášků a pro brusné papíry. Na povrchu vzorků je mnoho míst, kde je lokální sklon výstupů natolik vysoký, že se paprsky světla neodrážejí zpět do objektivu mikroskopu a tato místa se stávají neměřitelná.

Pro stanovení počtu zrn na  $1 \text{ cm}^2$  byla využita obrazová analýza MatLabu:

- Prášek 1:  $60 \text{ zrn/cm}^2$
- Prášek 2:  $90 \text{ zrn/cm}^2$

### 2.7.4 Vzorky upravené pomocí laseru

V této práci byly na povrchu PES fólie pomocí laseru vyrobeny drážky. Drážkovaný povrch je dostatečně drsný, nejde ale popsat běžnými parametry drsnosti, jako  $R_a$  a  $R_q$ . Nejde ani stanovit počet zrn na jednotku plochy. Parametry popisující povrch laserem upravených vzorků jsou hloubka drážky a rozpětí mezi nimi.

Rozpětí mezi drážkami zůstává stejné. Pomocí obrazové analýzy v MatLabu byly stanoveny následující hodnoty:

- Rozpětí mezi drážkami:  $650 \mu\text{m}$
- Hloubka drážek, viz. tab. 5

Tab. 5 Hloubka drážek na PES fólii v závislosti na době pulsu.

Doba pulsu, [ $\mu\text{s}$ ]	160	170	180	190	200
Hloubka drážky, [ $\mu\text{m}$ ]	2	8	12	14	17

Připomeneme, že v popsaném experimentu „flapping foil“, viz. \_\_\_\_, se používal speciální silikonový rýhovaný materiál s parametry: výška rýh –  $87 \mu\text{m}$ , rozpětí mezi rýhami –  $340 \mu\text{m}$ . [1].

Geometrie příčného řezu tohoto materiálu a laserem upravené PES fólie je docela podobná. Silikonový materiál má ale výrazně větší hloubku drážek.

### 2.7.5 Kompletní porovnání drsností povrchů

V tab. 6 jsou uvedeny naměřené parametry drsností povrchů. Jak je vidět z tabulky, nebylo nalezeno univerzální kritérium pro možnost porovnání drsností povrchů mezi sebou.

Tab. 6 Parametry drsností povrchů.

	<b>Ra, [μm]</b>	<b>Rq, [μm]</b>	<b>Velikost zrn, [μm]</b>	<b>Počet zrn na cm<sup>2</sup></b>	<b>Hloubka drážek, [μm]</b>	<b>Rozpětí mezi drážky, [μm]</b>
<b>Folie</b>	0,02	0,03	x	x	x	x
<b>Prasek 1</b>	x	x	300 až 350	60	x	x
<b>Prasek 2</b>	x	x	150 až 180	90	x	x
<b>Brusny papír 30</b>	x	x	největší 1000	30	x	x
<b>Brus. Papír 150</b>	x	x	90 až 120	150	x	x
<b>Brus. Papír 280</b>	x	x	50 až 60	280	x	x
<b>Kyselina 5 sec</b>	x	x	1 až 5	x	x	x
<b>Kyselina 20 sec</b>	0,42	0,54	1 až 5	x	x	x
<b>Kyselina 40 sec</b>	x	x	1 až 5	x	x	x
<b>Laser 160</b>	x	x	x	x	2	650
<b>Laser 170</b>	x	x	x	x	8	650
<b>Laser 180</b>	x	x	x	x	12	650
<b>Laser 190</b>	x	x	x	x	14	650
<b>Laser 200</b>	x	x	x	x	17	650

$R_a$  - střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu

$R_q$  - střední kvadratická hodnota drsnosti povrchu

## 2.8 Měření odporové síly

Pro zjištění pasivní odporové síly bylo rozhodnuto otestovat hotové vzorky v hlubokém, širokém potoce (typu – koryto) se stacionárním laminárním prouděním. Měření pasivního odporu je prvním krokem ke zjištění celkové odporové síly. Lze také

připomenout, že aktivní odporová síla je významnější. Vzhledem ke složitosti návrhu experimentu a komplikovanosti přístrojů pro měření aktivního odporu, bylo rozhodnuto zaměřit se na zjištění pouze pasivní odporové síly. Zkoumání aktivního odporu a také celkového odporu připravených vzorků lze nechat na následné pokračování výzkumu této problematiky.

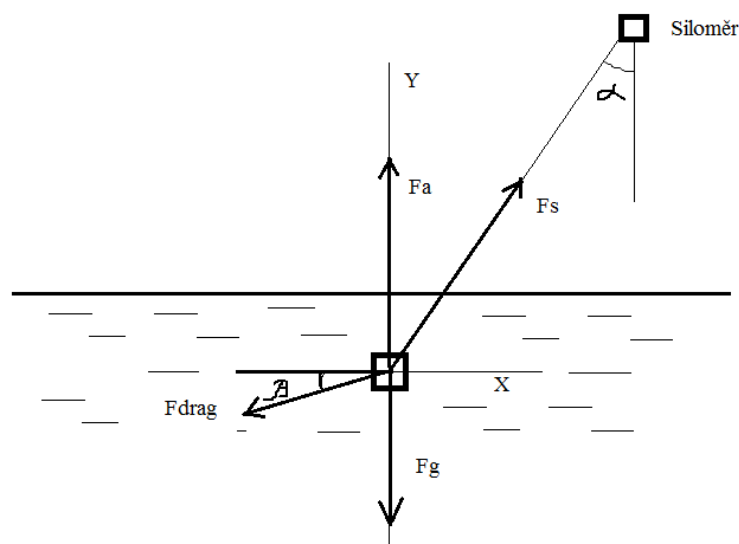
Byl také proveden experiment pro testování působení turbulentního proudění na vzorky. Vzorky ale konstantně byly buď na hladině vody, anebo silou proudu se nad ní vznášely, což způsobilo více než 50% variační koeficient u naměřených hodnot. Následně se rozhodlo pro testování pouze v laminárním proudění.

Pro tento experiment byly použity:

- Stlačný a roztažný siloměr
- Datalogger
- Kovové tyče a držáky
- Polyesterová nit
- Sponky

Prvním úkolem bylo nalézt úsek potoku nebo řeky, kde by bylo stacionární a laminární proudění vody s rychlostí, která odpovídá rychlosti plavání sportovců. Vybralo se místo s ustaleným laminárním prouděním, hloubka – 0,3 m, rychlost proudění – 1,3 m/s. Dno potoka bylo rovné a bez kamenů, což stabilizovalo podmínky experimentu.

Vzorek se pomocí sponky a nitě připevnil k siloměru. Siloměr se upevnil na můstku ve výšce 1 m nad potokem pomocí laboratorních kovových tyčí a držáků. Délka nitě – 1,1 m. Následně byl vzorek ponořen do proudící vody. Data se začala snímat po 30 sekundách vzorku v potoku. Vzorek se nacházel přibližně 2 cm pod vodou. Schematické zobrazení měřicího systému je na obr. 51.



Obr. 51 Schematické zobrazení měřicího systému se silami působícími na vzorek, kde

X, Y – osy

$\alpha, \beta$  – úhly

$F_s$  – naměřená síla

$F_A$  – vztlaková síla

$F_{drag}$  – pasivní odporová síla

$F_G$  – tíhová síla

Podle naměřené síly  $F_s$  nelze posuzovat odporovou sílu, protože vzorky mají různou hmotnost a vztlakovou sílu. Je velice podstatné odečíst jejich hodnoty od naměřené síly pro porovnání pouze odporové síly při dané rychlosti proudění, která bude způsobena drsností povrchu. Také má vliv hydrofilita nebo hydrofobita materiálů, v této práci se jejich vliv zkoumat nebude.

Pro výpočet  $F_{drag}$  lze rozložit síly ve směru os X a Y.

$$X : F_s \sin \alpha - F_{drag} \cos \beta = 0 \quad (7)$$

$$Y : F_A - F_G + F_s \cos \alpha - F_{drag} \sin \beta = 0 \quad (8)$$

$$X : F_s \sin \alpha = F_{drag} \cos \beta \quad (9)$$

$$Y : F_A - F_G + F_s \cos \alpha = F_{drag} \sin \beta \quad (10)$$

Vydělíme druhou (10) rovnicí první (9):

$$\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{F_A - F_G + F_s \cos \alpha}{F_s \sin \alpha} = \operatorname{tg} \beta \quad (11)$$

$$F_{drag} = F_s \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} \quad (12)$$

Mezi měřenou silou  $F_s$  a  $F_{drag}$  je lineární závislost, proto budou mít při zpracování obě síly stejný variační koeficient.

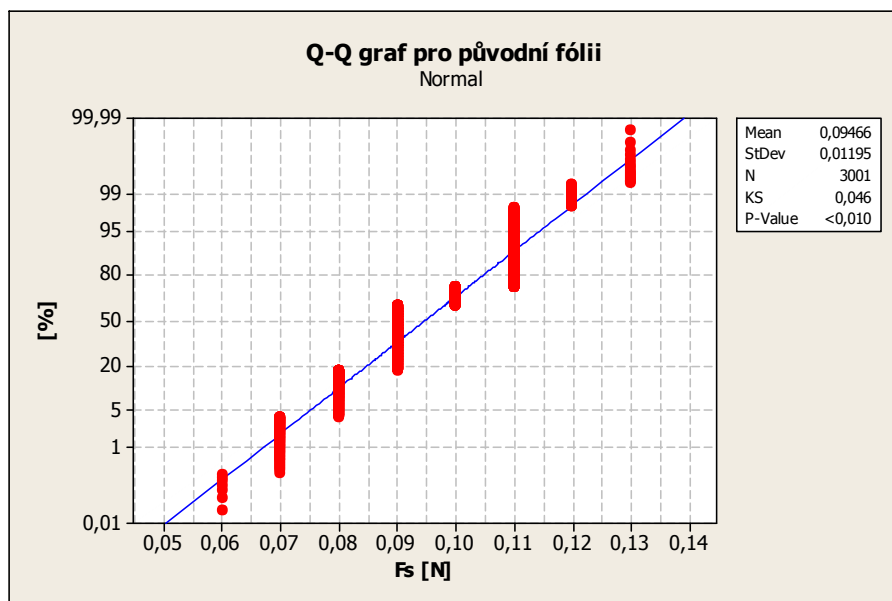
Z výpočtů plyne, že po stanovení úhlu  $\beta$  lze stanovit pasivní odporovou sílu. Úhel  $\alpha$  byl konstantní a dá se vypočítat z výšky upevnění siloměru nad vodou a délky nitě.

$$\cos \alpha = \frac{1}{1,1} = 0,910 \quad (13)$$

Před vlastním snímáním hodnot se provedlo orientační měření pro srovnání naměřených hodnot a chyby siloměru. Pro vzorek původní fólie o rozměrech 10 x 12cm průměrná hodnota naměřené síly byla 0,09 N. Chyba přístroje – 0,01 N. Platí, že snímané hodnoty musí být alespoň třikrát větší, než chyba přístroje. V tomto experimentu tato podmínka byla splněna. Dalším účelem předběžných měření byla následná kategorizace naměřených hodnot.

Záznam dat se prováděl po dobu 30 s s intervalem 0,01 s, tudíž pro každý vzorek se získalo 3000 hodnot.

I když platí, že pro velký výběr se předpokládá normalita dat, naměřené hodnoty se také otestovaly na normalitu pomocí Q-Q grafu v MiniTabu, obr.52.



Obr. 52 Q-Q graf. Testování na normalitu naměřených hodnot pro vzorek původní fólie.

Tíhová síla se zjistila podle vztahu:

$$F_G = mg \quad (14)$$

Kde  $F_G$  - tíhová síla

$m$  – hmotnost vzorku, [kg]

$g$  – tíhové zrychlení, [m/s<sup>2</sup>]

Vztlaková síla  $F_A$  se zjistila následující metodou: Kádinka s vodou se umístila na váhy a hodnota na vahách se vynulovala. Potom se vzorek o dané ploše na provázku ponořil do vody tak, aby se nedotýkal dna. Naměřená hodnota se vynásobila tíhovým zrychlením. V tab. 7 jsou uvedeny hodnoty  $F_G$  a  $F_A$ .

Tab. 7 Vztlaková a gravitační síly.

	$F_A$ , [N]	$F_G$ , [N]
Fólie	0,02	0,04
Prášek 1	0,04	0,04
Prášek 2	0,07	0,04
Brusný papír 30	0,10	0,15
Brusný papír 150	0,05	0,06
Brusný papír 280	0,04	0,06
Kyselina 5sec	0,01	0,01
Kyselina 20 sec	0,01	0,02
Kyselina 40 sec	0,02	0,02

Lze si všimnout, že pro Prášek 2 je hodnota vztlakové síly větší, než gravitační. Z toho plyne, že se vzorek nacházel na hladině vody.

Všechna naměřená data byla otestována stejným způsobem na normalitu. Naměřené hodnoty jsou homogenní a pocházejí z normálního rozdělení. V tab. 8 jsou uvedeny střední hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pro  $F_s$ . Je vhodné připomenout, že vzorky zpracované laserem nebyly dost velké pro testování na velikost odporové síly.

Tab. 8 Naměřená síla  $F_s$ .

	Naměřená síla, [N]	Směrodatná odchylka, [N]	Variační koef, [%]
Fólie	0,09	0,01	12,83
Prášek 1	0,19	0,01	6,37
Prášek 2	0,20	0,01	3,67
Br.p.30	0,44	0,02	3,89
Br.p.150	0,13	0,01	8,63
Br.p.280	0,12	0,01	5,84
Kyselina 5sec	0,09	0,01	9,10
Kyselina 20 sec	0,11	0,01	7,17
Kyselina 40 sec	0,10	0,01	8,00

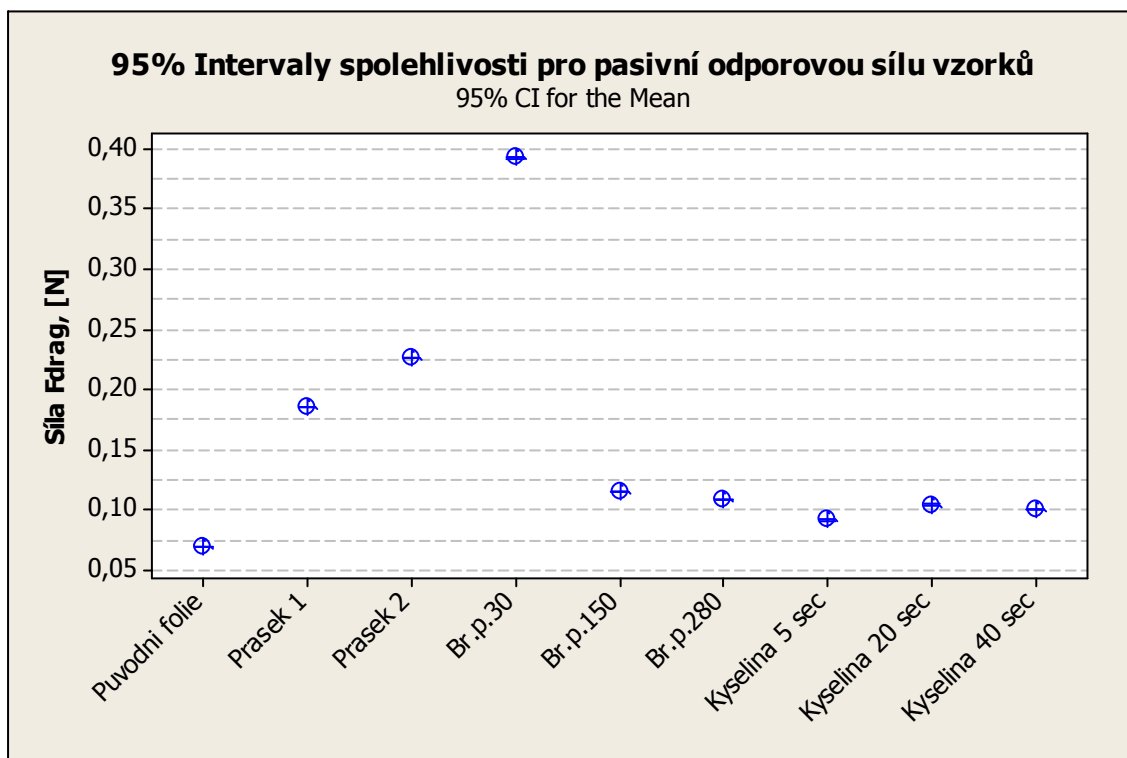
Podle (11) a (12) se spočítal úhel  $\beta$  a  $F_{drag}$ .

V tab. 9 jsou uvedeny střední hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pro  $F_{drag}$ .

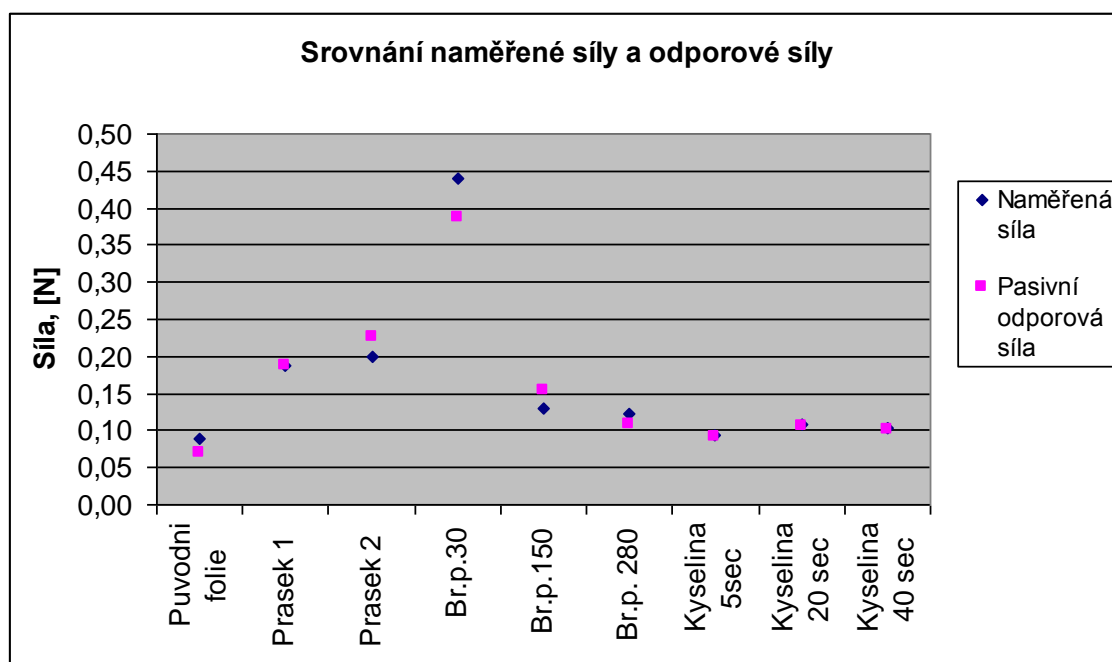
Tab. 9 Odporová síla  $F_{drag}$ .

	Odporová síla, [N]	Směrodatná odchylka, [N]	Variační koef, [%]
Fólie	0,07	0,01	12,83
Prášek 1	0,19	0,01	6,37
Prášek 2	0,23	0,01	3,67
Br.p.30	0,39	0,02	3,89
Br.p.150	0,12	0,01	8,63
Br.p.280	0,11	0,01	5,84
Kyselina 5sec	0,09	0,01	9,10
Kyselina 20 sec	0,11	0,01	7,17
Kyselina 40 sec	0,10	0,01	8,00

Na obr. 53 je srovnávací graf pasivních odporových síl vzorků. Srovnání mezi naměřenými hodnotami síly  $F_s$  a  $F_{drag}$  je na obr. 54.



Obr. 53 95 % Intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty odporových síl.



Obr. 54 Srovnání hodnot odporové síly a síly, naměřené pomocí siloměru.

Na obr. 54 je zřetelně vidět rozdíl mezi silou, naměřenou siloměrem a vypočítanou silou  $F_{drag}$ . Rozdíly jsou způsobeny různou hmotností vzorků a odlišnou vztlakovou silou.



Pro porovnání středních hodnot odporové síly vzorků byla použita jednofaktorová ANOVA s kontrastem:

$$F = 304648,93 \quad p = 0,000.$$

**Výsledky:**

- s 95% pravděpodobností lze tvrdit, že průměrné hodnoty odporové síly nejsou stejné.
- ANOVA s kontrastem prokázala, že lze potvrdit odlišnost všech vzorků mezi sebou.
- Z toho plyne, že různou úpravou povrchů lze dosáhnout různé odporové síly.

### 3. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zaprvé lze rozebrat pokus o vytvoření popraskaného povrchu PES fólie. V uvedeném zdroji popraskaný povrch vznikl při působení 70% kyseliny sírové po dobu 10 min. na polyesterovou fólii. V této práci pouze při použití 90% kyseliny sírové nastaly změny struktury povrchu. Rozdíl ve výsledcích lze vysvětlit pravděpodobnou odlišností struktur polymeru (různé modifikace).

Struktura povrchu polyesterové fólie po působení 90% a 95% kyseliny sírové získala velmi jemný a členitý povrch, řádově v nanometrech. Při zvětšení doby působení kyseliny na vzorek, se zvětšovala smáčivost povrchů, což v turbulentním proudění může způsobit zmenšení úplavu a minimalizaci vytváření vírů na povrchu materiálu, čili zmenšení celkové odporové síly.

Příprava vzorků pomocí laseru je velice snadná a v případě zpracování polymerů i bezodpadová metoda. Nelze ale měnit pomocí laseru kvalitu povrchu pro jakýkoliv polymer. V případě polyvinylchloridu polymer pouze zhnědne, ale k žádné změně struktury povrchu nedojde. Povrch polyesterových fólií se velice snadno upravuje laserem. Problémem je kroucení fólie při absorbování tak velkého množství energie. Experimentálně, kvůli následnému kroucení fólie a nestejnoměrnosti povrchu, se podařilo vytvořit vzorky pouze s malou plochou povrchu, který nebyl dostatečný pro následné měření pasivní odporové síly (naměřená síla byla přibližně stejná, jako chyba přístroje).

Pomocí laseru lze ale vytvořit geometrii povrchu, která již byla prokázána za úspěšnou při redukci odporové síly (rýhy). V případě polyesterové fólie lze kroucení potenciálně odstranit velmi dobrým chladicím systémem, nebo zkusit aplikovat metodu úpravy povrchu pomocí laseru na jiné materiály, třeba na PDMS. Světové značky jako SPEEDO se zaměřují na vytváření rýh na sportovních plavkách pro zmenšení odporové síly.

Úprava povrchu pomocí prášku se také prokázala jako velmi snadný způsob získání drsnosti. Pro lepší životnost tímto způsobem vytvořeného materiálu lze

doporučit předběžnou aktivaci povrchu, například chemikálií, a následné nanášení prášku. Pro lepší stejnoměrnost nanesené práškové vrstvy se doporučuje použití různých sít. Nevýhodou je poměrně velká jemnost prášků oproti velikosti otvorů v běžných sítích. S jemností prášku se také naráží na problém shlukování částic kvůli elektrostatickému náboji a následné nestejnoměrnosti povrchů nanesené vrstvy prášku.

Statistické zpracování hodnot kontaktních úhlů vzorků, nebo smáčivosti, a také hodnot pasivní odporové síly, prokázalo statisticky významný rozdíl mezi vytvořenými povrchy.

Pro vyhodnocení členitosti povrchů byly použity různé metody a několik přístrojů. Lze zdůraznit obtížnost měření drsnosti povrchů pro průhledné vzorky a vzorky s průhledným naneseným práškem optickou metodou. Ani mechanickou metodu nelze použít pro všechny vzorky. Kvůli získání parametrů drsnosti pomocí různých přístrojů a velmi odlišným profilům povrchu vzorků nebylo nalezeno jednotné kritérium pro porovnání drsnosti povrchů. Nemohl proběhnout návrh jednotného matematického modelu pro stanovení závislosti mezi drsností povrchů a odporovou silou.

Výsledky měření pasivní odporové síly zase prokázaly, že čím členitější a hrubší povrch, tím je větší pasivní odporová síla. Platí to ale i pro žraločí kůži, která je velice účinná pro zvýšení výkonu při plavání v turbulentním proudění. Zajímavé je, že statisticky rozdílné střední hodnoty pro pasivní odporovou sílu, jsou stejně velmi blízké. Za náhle vybočující hodnotu lze považovat pouze střední pasivní odporovou sílu Brusného papíru 30, jehož povrch byl velmi hrubý a rozměry částic abrazivního materiálu na povrchu byly velmi variabilní.

Při této studii se zanedbal vliv rozptylu hodnot vztahové a tíhové síly na výsledný rozptyl hodnot síly odporové. V následném zkoumání této problematiky lze vlivy těchto rozptylů započítat a také se pokusit o získání přesnějšího siloměru. Jinak se metodika měření pasivní odporové síly vzorků prokázala jako úspěšná.

## 4. ZÁVĚR

Cíle této diplomové práce, jako příprava materiálů s různou drsností povrchů, popis jejich drsnosti a návrh experimentu pro měření odporové síly, byly úspěšně splněny. Během vypracování se použily různé metodiky měření a konstruktivní řešení problémů.

Práce poskytuje široký přehled možností výroby materiálů jak s běžným, tak i netradičním profilem povrchu. Je velice přínosná v oblasti povrchových úprav pro získání různých typů drsnosti. Nelze vynechat praktickou užitečnost popisu metodik a přístrojů, použitých pro přípravu vzorků a získání parametrů drsnosti.

Experimentální část prokázala, že smáčivost a odporová síla závisí na struktuře a drsnosti povrchů, což nelze opomenout při návrhu sportovních plavek, potápěčského oblečení apod. Vytvořený materiál na podkladu z fólie lze následně upevnit na textilním podkladu celoplošným nebo bodovým pojením, například ve tvaru šupin. Aplikací materiálů s různou drsností na různé části sportovních plavek lze dosáhnout minimální odporové síly při plavání, tudíž zvětšit výkon plavce. Vyrobené materiály lze také testovat na změnu úplavu a chování proudění vody po povrchu materiálu v turbulentním a přechodovém proudění.

Plánuje se dále pokračovat ve výzkumu této problematiky, rozšířit zkoumání i na jiné materiály a také využít metodik, popsanych v rešeršní části.

## Seznam Použité Literatury

- [1] OEFFNER, J., Van LAUDER, G. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *The Journal of Experimental Biology*, 2012, č. 215. ISSN 022-0949.
- [2] ABASI, S. a kol. Construction of drag force measuring system to characterize the hydrodynamics properties of swimsuit fabrics. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2012, č. 0(00), [cit. 11.5.2013]. ISSN 1530-8057. Dostupné z: <http://jit.sagepub.com/content/early/2012/07/04/1528083712452901.full.pdf+html>
- [3] SPEEDO Behind the technology. [online], [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: <http://www.speedousa.com/technology/>
- [4] Drugs and sports technology. [online], [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: <http://cbraccio.pbworks.com/w/page/4362483/Drugs%20and%20Sports%20Technology>
- [5] Sharklet Technologies: *Inspired by Nature*. [online], [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: <http://www.sharklet.com/technology/>
- [6] Povrchy povlaků – Mikrogeometrie. [online], [cit. 5.5.2013]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf)
- [7] Měření drsnosti povrchu. [online], [cit. 5.5.2013]. Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/Sortiment/Mereni-drsnosti-povrchu.html>
- [8] MAŠTOVSKÝ, O.: *Hydromechanika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [9] DEMO, P.: *Fyzika*. Praha: Česká technika, nakladatelství ČVÚT, 2008. ISBN 978-80-01-04171-0.
- [10] KOPAL, A. a kol.: *Fyzika I*. Skriptum TU v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-903-1.
- [11] TOUSSAINT, H., HOLLANDER, A., BERG, C., VORONTSOV, A. Exercise and Sport Science: Biomechanics of swimming. [online], 2000. [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: <http://koreaswimming.co.kr/pds/Garrett-swimming.pdf>
- [12] Swimming: It's a drag. [online], [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: [http://www.publish.csiro.au/video/projects/FINA/sections/teach/swimming\\_itsadr ag.html](http://www.publish.csiro.au/video/projects/FINA/sections/teach/swimming_itsadr ag.html)

- [13] The Physics and Biomechanics of Swimming: Types of Drag and Resistance Forces. [online], [cit. 5.5.2013]. Dostupné z:  
<http://swimright23.webs.com/dragandresistance.htm>
- [14] Large Bore Pipe Systems. [online], [cit. 10.5.2013]. Dostupné z:  
<http://www.coolit.co.za/pipeflow/bigpipe.htm>
- [15] KOPECKÝ, V.: *Laserové Anemometrie*. Liberec, 2006. ISBN 80-7083-945-7.
- [16] SCHWEIKART, A., FERY, A. Controlled wrinkling as a novel method for the fabrication of patterned surfaces. *Microchim. Acta*, 2009, č.165. ISSN: 0026-3672.
- [17] GENZER J., GROENEWOLD J. Soft matter with hard skin: From skin wrinkles to templating and material characterization. *Soft Matter*. 2006, č.2. ISSN: 1744-683X.
- [18] MEI, Y., KIRAVITTAYA, S. a kol. Principles of micro and nanoscale wrinkles. Elsevier: *Materials Science and Engineering: R*, 2010, č.70. ISSN: 0020-0190.
- [19] SVELTO, O.: *Principles of Lasers*. New York: Plenum Press, 1989.
- [20] SEDLÁČEK, K.: *Laser v mnoha podobách*. Praha: Naše vojsko, 1982.
- [21] KOEBNER, H.: *Industrial applications of Lasers*. Chichester [West Sussex]; New York: Wiley, 1984.
- [22] THYS, M., DESMET, E.: *Laser Beams: Theory, Properties and Applications*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 2001. ISBN 978-1-60876-266-8.
- [23] WIENER, J., ŠTĚPÁNKOVÁ, M., DEMBICKÝ, J.: *Impact of LaserThermal Stress on Cotton Fabric*. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 2010, Vol. 18, č.3 (80).
- [24] MERTLÍKOVÁ, J. *Nanostrukturní materiály v textilu*. Liberec, 2004. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci, fakulta Textilní.
- [25] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna*. Skriptum TU v Liberci, 2002.
- [26] IR laser. [online], [cit. 9.5.2013]. Dostupné z:  
[http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/pristroje/IR\\_laser.pdf](http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/pristroje/IR_laser.pdf)
- [27] Advex Instruments [online], [cit. 9.5.2013]. Dostupné z:  
[http://www.advex-instruments.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1&Itemid=26](http://www.advex-instruments.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=1&Itemid=26)
- [28] Automated System measures micro- and nano-fibers. [online], [cit. 9.5.2013]. Dostupné z:

<http://news.thomasnet.com/fullstory/Automated-System-measures-micro-and-nano-fibers-558466>

[29] Talysurf CLI. [online], [cit. 10.5.2013]. Dostupné z:

[http://www.tisecco.org/Product\\_PDF/TH/Non%20Contact%20Profiles/talysurf-cli-systems.pdf](http://www.tisecco.org/Product_PDF/TH/Non%20Contact%20Profiles/talysurf-cli-systems.pdf)

[30] Bruker 3D Optical Microscopy. [online], [cit. 10.5.2013]. Dostupné z:

<http://www.bruker.com/products/surface-analysis/3d-optical-microscopy.html>

[31] Vybavení pro výuku přírodovědných oborů. [online], [cit. 5.5.2013]. Dostupné z:

<http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/dfs-bta/>

[32] Vybavení pro výuku přírodovědných oborů. [online], [cit. 5.5.2013]. Dostupné z:

<http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/LABQ2>

[33] Analýza rozptylu (ANOVA). [online], [cit. 10.5.2013]. Dostupné z:

<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>

Dodatek A

**Naměřená data kontaktních úhlů a síl.**

Tab. A-1 Naměřená data kontaktních úhlů, kyselina, [°].

	Původní fólie	2 s	5 s	10 s	15 s	20 s	25 s	30 s	35 s	40 s	45 s
1	83,3	65,1	64	64,5	55,2	58,4	51,3	55	44	46,2	42,6
2	81,3	58,7	61,9	64,9	43,1	53,8	55,4	56,4	37,8	41,3	42
3	78,9	60	61,8	53,3	44,4	47,5	56,8	51	39,3	40,5	37,2
4	78,8	61,2	61,3	68,6	47,7	52,3	57,3	46	45,5	46,1	38
5	78,8	62,9	62,4	59,5	45,7	52,1	50,1	51,7	41,5	38,5	38,5
6	78,1	64,2	63	60,4	52,8	50,5	44	57,9	38,7	39,5	37,4
7	77	60,3	62,7	55,4	44,7	57,1	45,2	54	36,9	48,8	49,6
8	79,5	63,3	62,2	68,2	52	56,1	46,3	52,6	37,2	44,4	46,3
9	80,2	62,7	60	68,5	53,4	55,1	43,8	44,2	41,7	44,2	56,5
10	82,7	59,5	61,7	55,3	52,8	49,5	49	43,3	37,6	41	54,2
11	79,1	58,4	63,3	63,2	51,1	51,7	47,4	50,2	45	45,6	48,2
12	78,6	61,7	62,8	64	50,5	51,2	44,9	46,1	40,8	42,9	42,3
13	79,8	62,4	63,5	59,7	49,4	52,4	46,1	45,3	39,8	41,1	44,4
14	78,5	65,2	62,4	60,5	55,3	55,6	48,2	44,9	43	39,7	38,5
15	79,6	62,5	61,9	59,9	53,6	51	46,8	45,6	41,2	39,4	40,6

Tab. A-2 Naměřená data kontaktních úhlů, laser, [°].

	160 podel	160 pric	170 podel	170 pric	180 podel	180 pric	190 podel	190 pric	200 podel	200 pric
1	38,1	40,8	36,4	38,2	39	40,3	47,5	49,8	55,5	54,5
2	32,7	38,2	37,2	39,8	41,8	44,5	45,3	52,1	50,3	52,6
3	31,5	42,3	38,3	43,2	41,3	42,8	49,7	50,3	54,3	51,5
4	34,2	41,7	39,8	42,7	40,5	39,4	46,8	48,4	52,1	54,9
5	32,5	38,1	36,8	40,7	39,1	41,7	48,2	52,3	51,9	53,9
6	35,4	37,5	39,2	41,3	40,4	42,1	45,4	53,5	54,9	52,8
7	36,9	40,2	35,8	38,9	39,2	43,5	46,1	51,1	53,8	54,1
8	32,4	39,7	37,1	39,4	38,9	44,2	46	50,7	54,2	53,8
9	33,7	37,2	35,7	43,6	42,4	45,1	47,2	50,2	54,7	53,5
10	37,4	39,8	37,5	42,1	41,5	43,9	48,6	48,6	55,2	55
11	35,2	40,1	36,4	40,9	39,7	43,1	44,6	49,2	50,8	54,9
12	34,5	39,6	38,2	42,7	38,9	42,6	45,2	49,8	52,4	54,3
13	32,8	37,4	37,3	43	42,1	43,7	46,1	50,9	50,5	52,5
14	31	38,1	36,9	42,5	40	43,8	43,7	48,4	52	53,7
15	36,9	39,9	35,8	41,8	42,3	44,4	44,9	49,1	53,2	51,6

Podel – podél vytvořených drážek

Pric – napříč vytvořených drážek



Tab. A-3 Naměřená data kontaktních úhlů, prášky a brusné papíry, [°].

	Prášek 1	Prášek 2	Br.p.30	Br.p.150	Br.p.280
1	85	82,5	58,9	71,1	60,1
2	82,7	85,3	66,2	65,3	54,2
3	82,6	83,2	57,3	68,9	53,2
4	86,2	78,5	64,3	73,4	58,2
5	81,7	75,8	72,5	73,1	58,4
6	82	80,3	78,3	67,3	55,2
7	85,1	81,7	67,4	69,5	59,1
8	81,9	79,6	62,3	72,8	55,6
9	84,2	77,4	70,1	66,6	55,1
10	83,1	78,2	66,4	68,4	54,6
11	82,9	81,2	59,8	69	57,8
12	81,5	82,1	75,4	72,5	53,1
13	84,8	80,9	71,7	70,9	57,2
14	83,3	83,1	59,4	71,2	56,3
15	85,1	82,3	64,2	72,5	53,9

Tab. A-4 naměřená data síl, [N].

	Fólie	
	Třídni průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,06	24
2	0,07	94
3	0,08	999
4	0,09	716
5	0,10	829
6	0,11	283
7	0,12	55

	Prášek 1	
	Třídni průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,15	11
2	0,16	35
3	0,17	361
4	0,18	708
5	0,19	1632
6	0,20	81
7	0,21	100
8	0,22	41
9	0,23	10
10	0,24	12
11	0,25	9

	Prášek 2	
	Třídni průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,18	7
2	0,19	242
3	0,20	1599
4	0,21	1148
5	0,22	4

	<b>Brusný papír 30</b>	
	Třídní průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,38	4
2	0,39	10
3	0,40	32
4	0,41	115
5	0,42	149
6	0,43	604
7	0,44	864
8	0,45	581
9	0,46	406
10	0,47	160
11	0,48	61
12	0,49	14

	<b>Brusný papír 150</b>	
	Třídní průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,10	45
2	0,11	75
3	0,12	424
4	0,13	772
5	0,14	1544
6	0,15	102
7	0,16	38

	<b>Brusný papír 280</b>	
	Třídní průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,10	3
2	0,11	395
3	0,12	1470
4	0,13	827
5	0,14	296
6	0,15	9

	<b>Kyselina 5 s</b>	
	Třídní průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,07	106
2	0,08	526
3	0,09	1548
4	0,10	620
5	0,11	193
6	0,12	7

	<b>Kyselina 20 s</b>	
	Třídní průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,08	13
2	0,09	132
3	0,10	1004
4	0,11	1367
5	0,12	461
6	0,13	23

	<b>Kyselina 40 s</b>	
	Třídni průměr, [N]	Počet hodnot
1	0,08	52
2	0,09	328
3	0,10	1321
4	0,11	1041
5	0,12	243
6	0,13	15